

コロナ放電光像観測とデータ処理

荒井健次*・加藤仁志**

Observation and the Data Processing on the Image of Corona Discharge

Kenji Arai and Hitoshi Kato

For the investigation on a point corona discharge phenomena, it is important to make clear the space distribution of emitted rate of photons due to the discharge. The image of the discharge light were photographed with long time exposure using highly sensitive films for the purpose. Brightness distribution on the images were derived from the digital data processing. The processed results showed the possibility of deriving the distribution on the emitted rate of photons.

1. まえがき

針対平板電極その他の不平等電極系における気中放電現象に関しては、古くから数多くの実験および詳細な理論的研究が行われてその研究成果が欧米や我が国で報告されており、その主な結果を Loeb が的確にまとめている⁽¹⁾。このような不平等電界中においては空間電荷の放電進展に与える影響の強いことが知られており、空間に設置した静電誘導型プローブや放電電極の一部を絶縁した形のプローブにより空間電荷による誘導電圧の測定が行われている。しかしそれらの測定データのみから空間電荷密度分布やその経時変化を正確に導出するのは容易でなく、種々の仮定を設けて近似計算によりその分布を導出し、種々の検討が行われている⁽²⁾⁽³⁾。一方、放電に伴う発光特性を調べる研究も広く行われている⁽⁴⁾。そこで同軸円筒電極系のコロナ放電光をフィルムで捕らえて適切な校正を施すことにより、輝度分布を導いて放電現象に伴う光子発生率を導出し⁽⁵⁾⁽⁶⁾、また針対平板電極系の気中放電に伴う発光の波長スペクトル分布を調べ、その結果を用いて放電電流のトリチェルパルス波形と光子発生率波形の計算機シミュレーションを行い、実験結果との比較検討を行ってきた⁽⁷⁾⁽⁸⁾。なお高速ストリークカメラを用いて短ギャップの火花放電による輝度分布の経時変化を捕らえ、それより光子発生密度の時間変化を導出する手法も検討してきた⁽⁹⁾。今回は短ギャップ針対平板電極系の気中放電により発生する空間電荷分布を、励起係数および電離係数と電界強度との関係⁽¹⁰⁾より光学的に導出する事を最終目的として、まず放電に伴う発光像を捕らえてそのデジタル処理により二次元で観測した輝度分布を導出し⁽¹¹⁾、その分布形より三次元の光子発生密度分布導出を試みたのでその結果を報告する。

*電気工学科 **電気工学専攻大学院生

2. 実験装置と画像処理

〈2.1〉実験装置 実験に用いた測定回路および針対平板放電電極系を図1(a), (b)に示す。(a)図のように1[kΩ]の抵抗を平板電極と接地間に挿入し、その両端に生じる放電電流に比例した電圧波形を周波数帯域幅 400 [MHz], 2チャンネルのデジタルオシロスコープ(ソニー:TDS 380型)に導いて測定し、同時に放電瞬時の印加直流高電圧値を高電圧分圧器を介して測定した。なお(b)図の放電棒電極には、直径1.6[mm]のステンレス棒先端を円錐状に加工して用い、その平板電極とのギャップ長 G は9[mm]一定に保って実験を行った。

棒電極先端から伸びる放電光像は、焦点距離135[mm], F3.6のレンズを接写リングを介して取り付けた1眼レフカメラを使用して撮影したが、その微弱なコロナ放電光を捕らえるためISO 3600の高感度フィルムを使用して最大10分間の長時間露光を行った。なお、周囲暗部の雑音レベルを出来るだけ低下させるため、放電電極部分は暗箱中に設置した。

〈2.2〉画像処理 写真フィルム上に捕らえた放電光像は、定量的データ処理を容易にするため、光学的解像度2400[ピクセル/インチ]、3色、ピクセルの深さ30[ビット](10ビット/色)のフォトスキャナ(HP PhotoSmart)を用いてビットマップ(BMP)デジタル画像に変換した。

この放電光BMP画像からの輝度分布導出に先立ち、周囲暗部のノイズレベルを低下させるため最大値フィルタ・最小値フィルタ・中央値フィルタ・平均値フィルタなどの種々のフィルタを適用して比較検討を行った。その結果、放電光BMP画像に含まれているところの、いわゆる”ごましおノイズ”の除去には中央値フィルタが適当であると言われているが、今回の光像では平均値フィルタが最もノイズ低減効果のあることを見出した。そこでこのノイズ低減処理を施した後、次式^(1,2)を用いてBMP画像のR・G・B各dig値から輝度レベルD[dig]を導出した。

$$D = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (1)$$

なお、以下に示す相対輝度dig値は、発光部分の輝度dig値から、電極から離れた所の明らかに発光していない領域における輝度digの平均値を、差し引いた値である。

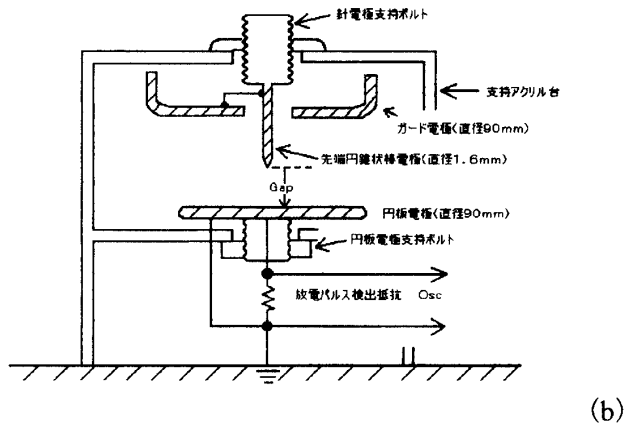
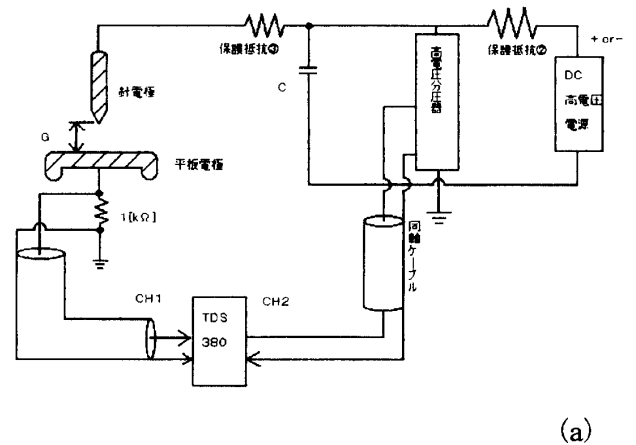


図1 実験装置

3. 実験結果と検討

〈3.1〉放電光像 ここで用いた針対平板電極系におけるコロナ放電開始電圧は、針側の印加電圧が正極性の場合（正針）4.6[kV]であり、負極性の場合（負針）では3.7[kV]であった。一方、火花放電に移行する電圧値は正針では10[kV]程度、負針では17[kV]程度であった。

この放電光像の撮影写真例を図2に示す。(a)図は正針の場合で印加電圧[kV]値は4.6[kV]/a-1, 5.0[kV]/a-2, 8.0[kV]/a-3,であり、電圧上昇に応じて針先からの放電光の進展および輝度上昇が顕著に見られる。(b)図は負針の場合で印加電圧[kV]値は5.0[kV]/b-1, 10[kV]/b-2, 15[kV]/b-3,である。この場合は電圧上昇に応じた放電光の進展および輝度上昇は正針の場合ほどには顕著には見られない。なお、(a-0)図は針電極対平板電極の写真であり、電極間距離および針電極太さなどを確認するために1[mm]間隔のグラフを同時に写している。

図3は電流波形測定例で、(a)図は正針のストリーマパルス、(b)図は負針のトリッチェルパルスであり、両者の波高値に顕著な相違が見られる。

これらの放電光像をBMP画像化して導出した正針および負針コロナ放電光の、相対輝度最高dig値を100[%]とし、20[%]間隔で描いた等輝度線を図4に示す。以下、針電極の中心軸

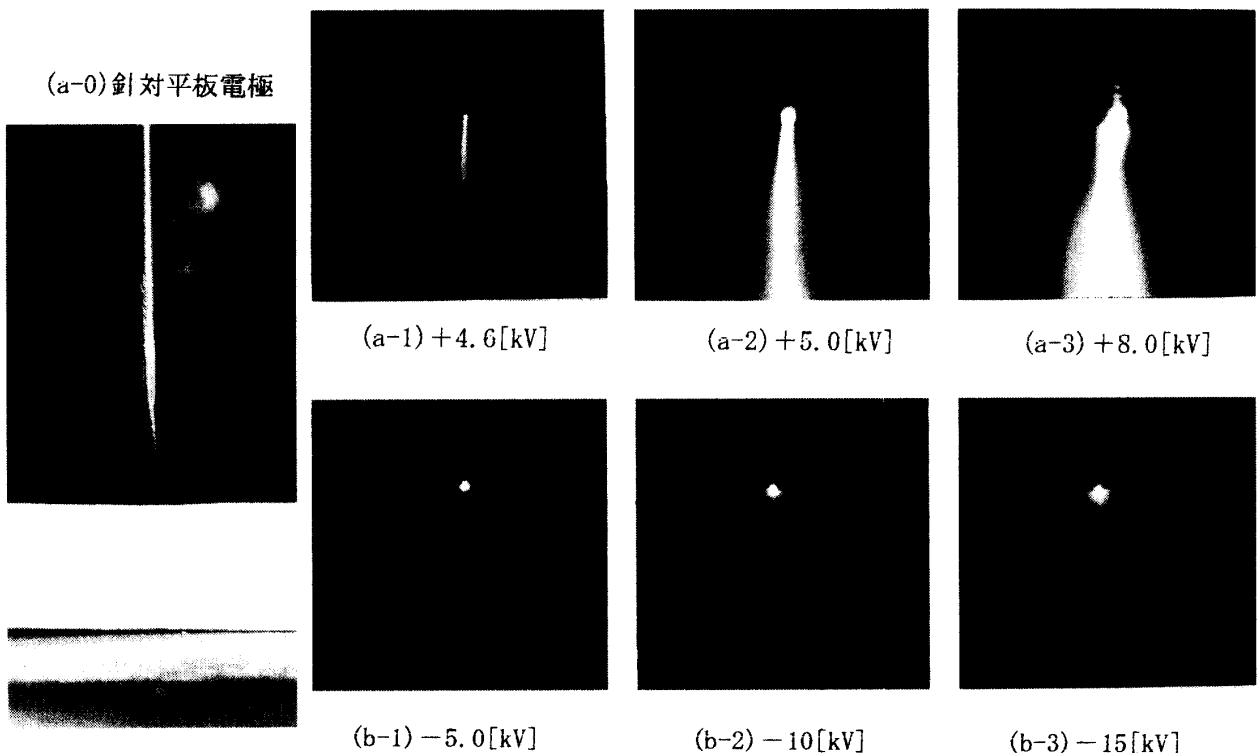


図2 正・負針端コロナ放電光像

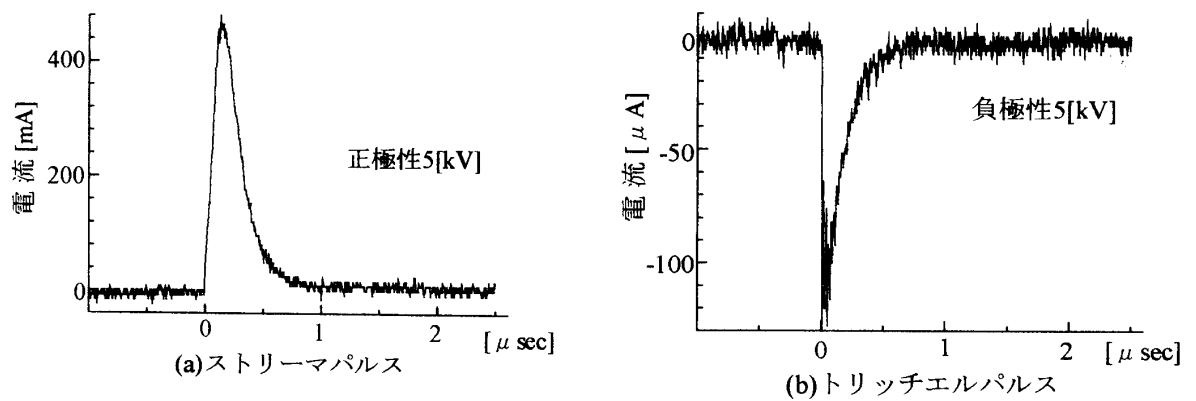


図3 コロナ放電電流波形

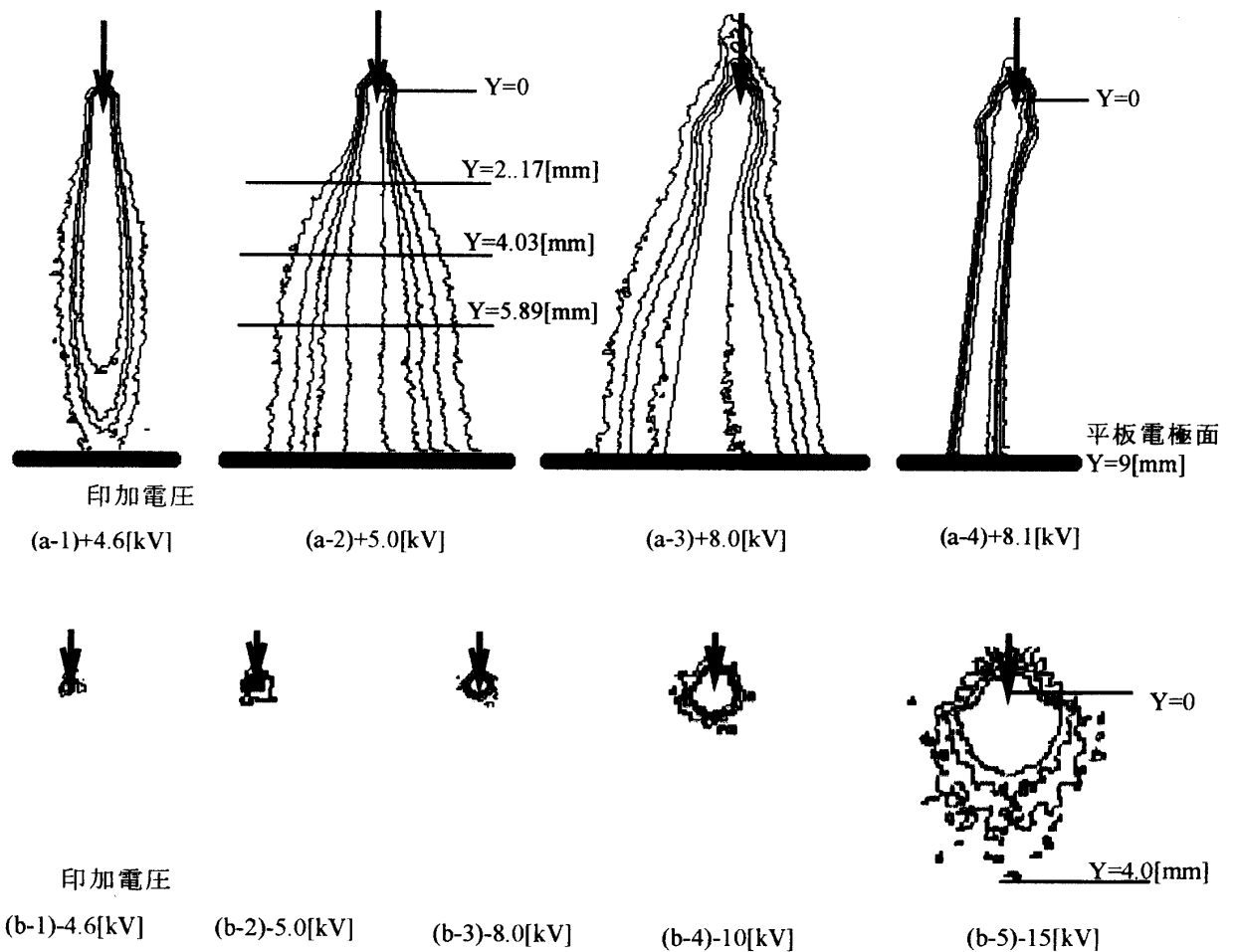


図4 正・負 針端コロナ放電光等輝度線

をY軸、それに対し直角の平板電極表面の方向をX軸として示し、針電極先端位置を $Y=0$ とした。この場合、平板電極表面は $Y=9$ [mm] となる。図5には 5、10、15 [kV] 印加時

の負針放電光像におけるX軸方向輝度分布を示す。

この (a) (b) (c) 各図は、 $Y=0$, $Y=0.31$, $Y=0.62$ [mm] における分布である。これらは 256[dig] のところで平坦になっている。写真光像をBMP画像に変換する際の輝度分解能が 8[bit] であり、また負針光像撮影時の長時間露光の結果として暗部の dig レベルが比較的高くなったために高輝度部分がカットされたものと考えられる。

なお、これらの図から輝度レベル 200[dig] のX方向の発光領域幅を調べると、5、10、15 [kV] の電圧上昇に応じて、(a)図では 0.30, 0.47, 1.07 [mm]、(b)図では 0.30, 0.73, 1.37[mm]、(c)図では 0.0, 0.30, 1.46[mm]、と広がっていく様子が明らかに分かる。この放電光像の高レベル発光領域における飽和部分は、同一印加電圧において露光時間幅のより短い光像撮影を行った結果の変換BMP画像を重ね合わせるにより、実際の輝度分布が導出できるといえる。

図4の正針放電光像 (a-2) 中に示した $Y = 2.17, 4.03, 5.89$ [mm] の各位置におけるX方向輝度分布を、図6に示す。

〈3.2〉光子発生密度分布 図6までの観測およびBMP化光像は、三次元広がりを持った放電光を二次元的に捕らえた輝度分布像である。したがってこの結果を用いて放電進展現象に伴う光子発生密度 P_d の空間分布を導出するためには、二次元量を三次元量に変換するデータ処理が必要となる。そこで、X-Z平面上のY軸からの距離 ρ ($\equiv \sqrt{X^2 + Z^2}$) 変化に対する P_d の変化を(2)式で示されるようなガウス分布形であると仮定した。

$$P_d(\rho) = P_{d0} \exp(-\rho^2 / \rho_k^2) \quad (2)$$

この式を光像(X-Y平面)観測方向のZ軸距離の関数になるように変形し、X値を固定して $P_d(Z)$ を $Z = -\infty \sim +\infty$ の範囲で積分した値が、図5、図6のようなX軸上のX点における観測輝度値に対応する量になると考え、輝度値 $D(X)$ に関連づけた関数形をまとめると次式となる。

$$\log D(X) = \log(K_b \cdot K_p \cdot \rho_k) - (1 / \rho_k^2) \cdot X^2 \quad (3)$$

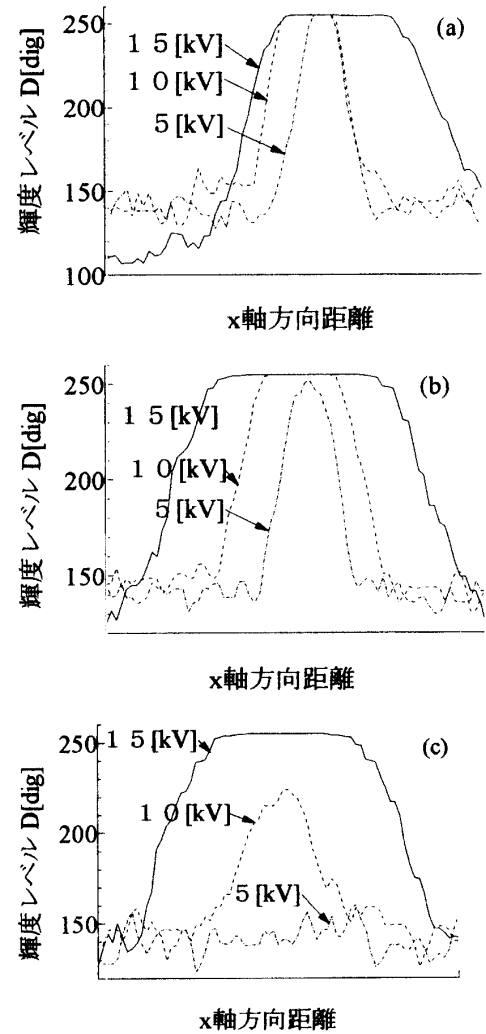


図5 負針放電光の輝度分布

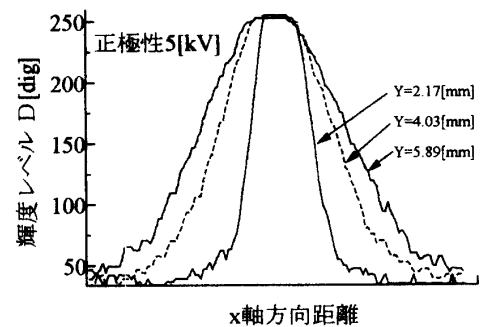


図6 正針放電光の輝度分

ここで K_0 は観測点への到着光子数密度をその点の観測輝度値に換算する係数、 K_p は発生光子総数と観測方向へ向かう光子数との比率を表す係数である。この(3)式の形で縦軸を $\log D(X)$ 値、横軸を X^2 値で図6のデータをプロットすると、図7のように各Y値における分布形はほぼ直線となった。これに最小自乗法を適用して ρ_k 値が得られる。したがって ρ 方向の光子発生密度分布 $P_d(\rho)$ は、(2)式のガウス分布形で近似表示できるといえる。

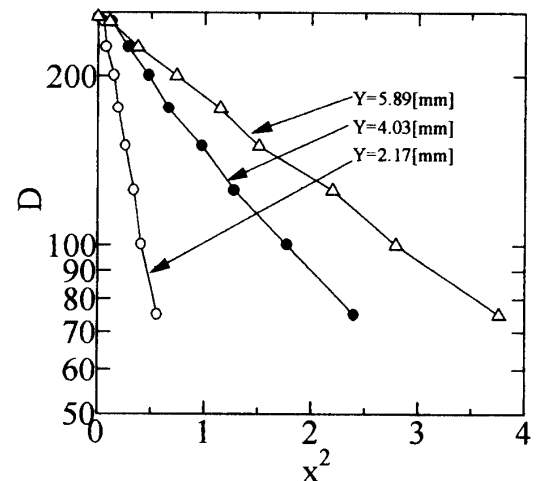


図7 輝度値[log D]の[X^2]分布

4. むすび

短ギャップの正極性および負極性の針対平板電極における空気中のコロナ放電発光像を撮影し、その画像をデジタル処理して二次元の輝度分布を導出したが、放電空間の光子発生密度分布をガウス分布形で近似することにより、得られた二次元の輝度分布からこの光子発生密度分布が導出できることを見出した。今後、このような手法で得られた光子発生密度分布に、励起係数および電離係数と電界強度との関係式を適用して空間電荷密度分布の導出を試み、放電現象の基礎的解析に役立たせたいと考えている。

参考文献

- (1) L.B.Loeb : "Electrical Coronas", Univ. of California Press, Barkeley (1965)
- (2) 上之園、山本、河野 : " 静電誘導形プローブ法による気中ギャップの空間電荷の測定"、電気学会論文誌 A、Vol.102, No.4, 235-242 (1982)
- (3) 荒井 : " 定常放電場の電界計測法"、静電気学会誌、Vol.10, No.6, 481-486 (1986)
- (4) 電気学会編 : " 放電ハンドブック"、オーム社 (1998)
- (5) K.Arai, N.Fujioka, I.Miyahara : "Image processing of the recorded film about discharge phenomena", Proc. of the 6th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), 42.24, 1-4 (1989)
- (6) 宮原、荒井、藤岡 : " 気中コロナ光の画像処理"、静電気学会誌、Vol.14, No.2, 146-153 (1990)
- (7) K.Arai, I.Miyahara et al : "Image processing of the Impuls discharge", Proc. of the 7th ISH, 72.07 (1991)
- (8) 宮原、荒井 : " 空气中短ギャップ放電光スペクトル強度の定量化処理"、静電気学会誌、Vol.19, No1, 41-48 (1995)
- (9) S.Zhou, K.Arai et al : "Image Measurering and Pprocessing System for Observation of Short-Gap Discharge in Gases", Proc. of Int. Conf. on Electronic Measurement and Instrument, PM2-2,74-77 (1992)
- (10) S.Badaloni and I.Gallimberti : "Basic Data of Air Discharge", University of Padva Report, 72/05 (1969)
- (11) 加藤、新郷、荒井 : " 負針コロナ光像観測とデータ処理"、電気関係学会北陸支部連合大会、A-21 (2000)
- (12) 谷口、他 : " 画像処理工学"、共立出版 (1996)

(平成12年12月4日受理)