

CVケーブルの新規残留電荷測定法による劣化診断（その2）

中部電力株式会社 宮島和久・内田克己*1
電力技術開発センタ 今博之*1・渡辺和夫*2

Investigation of Residual-charge Measurement for XLPE Cable (2)

K.Miyajima, Dr.K.Uchida, Dr.H.Kon & Dr.K.Watanabe

これまでに、水トリー劣化したCVケーブルの劣化診断手法として残留電荷測定法の検討を行ってきた。残留電荷測定法においては、交流電圧をステップ状に常時対地電圧程度まで複数回課電することにより得られる残留電荷量分布が、絶縁体中の水トリー分布を反映していることを見出した。つまり、残留電荷が放出される最高の交流課電電圧は、長い水トリーに起因している。この特性を利用し、残留電荷が放出される最高の交流課電電圧を劣化指標として用いる新たな残留電荷測定法を開発した。

We have been investigating the residual-charge measurement for diagnostic method of water-tree deteriorated cross-linked polyethylene cable. The distribution of residual charges obtained by using the method we proposed here could correlate to the water-tree distribution in cable insulation, that is, the residual charge component detected by higher AC voltage application could correspond to longer water trees. Therefore, the method we have developed is effective to diagnose the degree of water-tree deterioration.

1. ま え が き

CVケーブルが湿潤下において使用された場合、絶縁体中に水トリーが発生する場合があります。絶縁性能の低下を引き起こす。このような絶縁体の劣化に起因した停電事故を未然に防ぐために、絶縁体中の劣化状態を非破壊的に評価し得る手法の開発が望まれている。

これまでに、水トリー劣化診断手法として残留電荷法の適用を検討してきた。その結果、短尺試料では、残留電荷量と残存絶縁破壊強度との間には良い相関が認められており、本手法の有効性を確認した（図1）¹⁾。

残留電荷測定法は（財）電力中央研究所において開発された手法²⁾であるが、一般に残留電荷法における劣化診断の指標は残留電荷量であり、長尺ケーブルにおいて得られる残留電荷量はケーブル全長からの信号である。つまり、残留電荷量は軽微、中程度および極度な劣化信号の総和となる。よって、得られた残留電荷量が、軽微な劣化を反映しているのか、極度の劣化を反映しているのかを区別し、判定することは困難である。

上記課題を解決し、常時対地電圧以下の範囲で交流課電電圧をステップ状に複数回課電して残留電荷測定を行う方法を開発した。本手法において得られる残留電荷分布は水トリー発生分布を反映している。つまり、残留電

荷が放出される最高の交流課電電圧（電界強度）は、絶縁体中に発生している比較的長い水トリーに対応していることが示唆された。この原理を用いることにより、絶縁体中に発生している水トリーの様相を的確に把握することが可能である。

本報では、交流課電電圧をステップ状に複数回課電して残留電荷を測定する方法、およびこの有効性についての検討結果を報告する。

2. 新規残留電荷測定法

残留電荷測定法に関しては、これまでに報告してきた

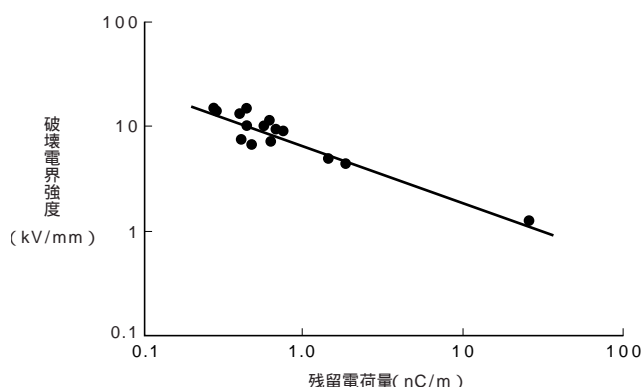


図1 残留電荷量と交流破壊電界強度
Correlation between residual charge and breakdown strength

*1（工博）

*2 部長（工博）

ものと基本的には同様であるので割愛する³⁾。開発した残留電荷測定法の概略および通常の残留電荷測定の課電法を図2, 3に示す。残留電荷法では、所定の直流電圧を課電した後交流電圧を課電する。この際、絶縁体中に水トリーが発生していると、直流課電時に水トリー部に電荷が蓄積され、これらは交流電圧を課電することにより放出される。この放出電荷は直流成分電流として検出される。

従来の残留電荷測定法では、単一の交流電圧を課電するが、新規開発の手法では、交流電圧課電時に、昇圧一定時間保持 降圧を低い電圧から順に、残留電荷を測定しながら所定の電圧まで繰り返す。本手法における所定の電圧とは、運転電圧相当を意味する。このようにして測定される結果を用いて、残留電荷が測定された最高の交流課電電圧（電界強度）にて劣化診断を行う方法である。測定条件は電圧階級により、表1に示す条件を用いた。

3. 検討結果

3.1 残留電荷量分布

交流課電電圧をステップ状に複数回課電することにより得られる残留電荷分布の例を図4, 5に示す。試料1, 2

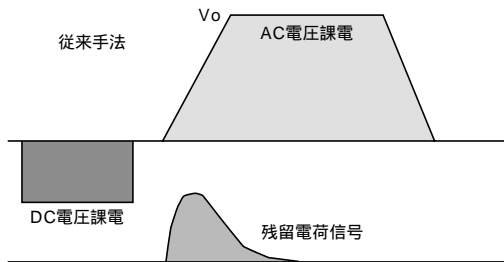


図2 残留電荷測定法（従来手法）
Conventional residual-charge measurement

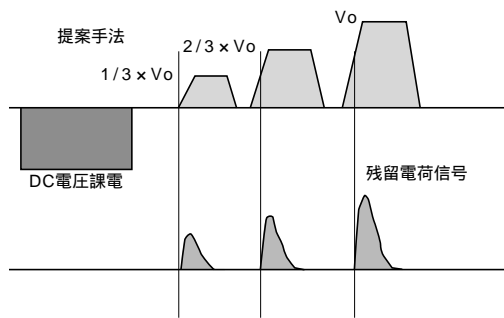


図3 残留電荷測定法（新規手法）
Proposed residual-charge measurement

表1 測定条件
Measurement conditions

項目	22kV CV	33kV CV
直流課電電圧	- 30kV/5min	- 40kV/5min
接地	1min	1min
交流課電電圧	ステップ電圧：3kV程度 最大課電電圧：常時対地電圧程度まで	

は33kV級の経年劣化したCVケーブルであり、試料長はいずれも約20mである。試料1, 2の詳細を表2に示す。本手法により残留電荷測定法を実施すると、ケーブル絶縁体の劣化程度により、異なる残留電荷分布が得られる。同図に示した試料においては、前者の交流破壊電圧が65kV程度、後者のそれが40kV程度と後者の方が前者に比較して破壊電圧が低く、劣化が進行していると言える。

試料1における残留電荷量分布は、3kV程度の低い交流課電電圧にて放出される残留電荷成分が最も多く、交流課電電圧が高くなるにつれて残留電荷量は少なくなる分布をしている。一方、破壊電圧が低い試料2においては、9kV程度の交流課電電圧で残留電荷量が最大値を持つ分布となる。

3.2 残留電荷量分布と水トリー発生分布

図4, 5に示した試料にける材料調査の結果得られた水トリー分布を図6, 7に示す。図4に示す3kV程度の低い交流課電電圧にて多くの残留電荷が放出される試料では、短い水トリーが多く存在する分布である（図6）。一方、9kV程度の高い交流課電電圧で残留電荷量分布が最大値を有する試料（図5）においては、比較的長い水トリーが多

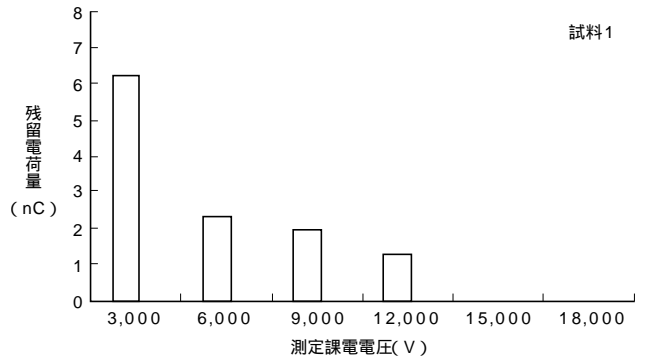


図4 残留電荷量分布（試料1）
Residual-charge distribution of sample 1

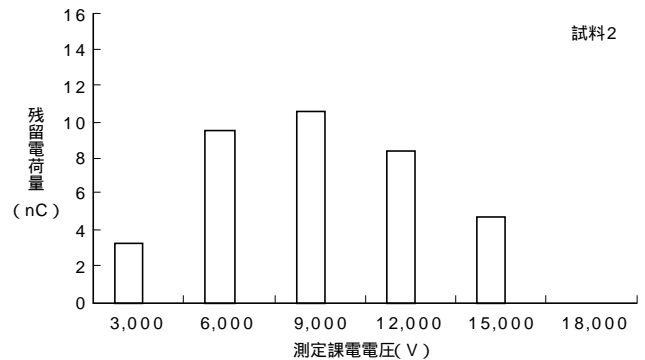


図5 残留電荷量分布（試料2）
Residual-charge distribution of sample 2

表2 試料条件
Sample conditions

項目	ケーブル種類	製造年
試料1	33kV CV / 250mm ²	1976年製
試料2	33kV CV / 150mm ²	1972年製

く存在する分布となっている(図7)。これらの比較から、交流課電電圧に対する残留電荷量分布と、水トリー長に対する発生個数分布は、定性的に類似した分布形状を持っていると言える。

残留電荷が放出される最高の交流課電電界強度(E_r)と材料調査により得られた最大水トリー長(L)との関係を図8に示す。同図から、 E_r が大きいくほど L は長くなり、 E_r と L の間に良い相関があって、残留電荷量分布の中で、

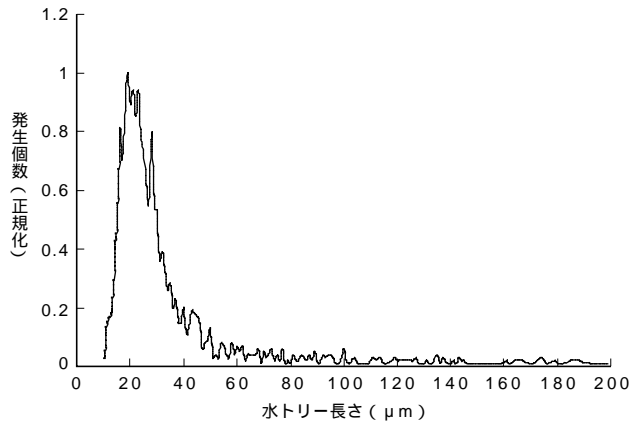


図6 水トリー発生分布(試料1)
Water-tree distribution of sample 1

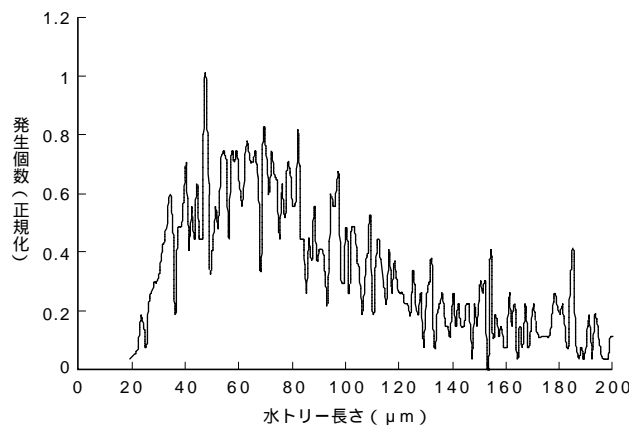


図7 水トリー発生分布(試料2)
Water-tree distribution of sample 2

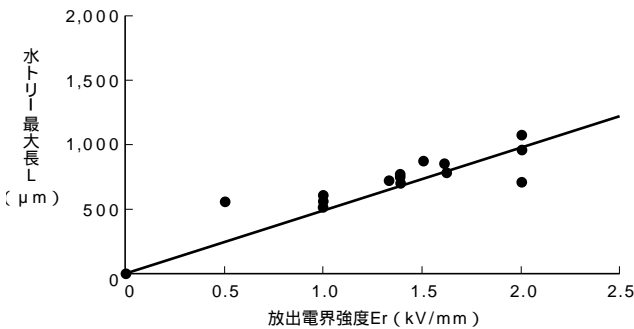


図8 残留電荷が放出される最高交流課電電界強度と最大水トリー長との関係
Correlation between maximum field strength at which the residual charge is detected and the longest water tree

高い交流電圧を課電しないと放出されない残留電荷成分は、長い水トリーを反映していることが示唆される。

3.3 残留電荷量分布と交流破壊現象の関係

次に、残留電荷量分布と交流破壊電界強度との関係について述べる。ステップ状に複数回課電する残留電荷測定法において、破壊試験前後で残留電荷分布がどのように変化するかを調査した。試験方法を図9に示す。交流破壊試験を実施する前に残留電荷量分布を測定する。同試料の商用周波電圧破壊試験を行った後、破壊孔近傍を取り除き、その他の部位において再度残留電荷量分布を測定した。

試料2における測定結果を図10に示す。図は破壊試験後に測定した残留電荷量を試験前の長さに変換し、残留電荷量の破壊試験前の残留電荷量に対する比を表している。もし、水トリー劣化が試料全体で一様である場合には、いずれの残留電荷成分も100%となるはずである。しかしながら、評価結果においては、100%にならない残留電荷成分が存在する。特に、高い交流課電電圧で放出される残留電荷成分ほどその減少が著しい傾向にある。測定精度の観点から、高い交流課電電圧において若干の残留電荷は残留している可能性はある。しかしながら、これを考慮した場合でも、低い交流課電電圧で放出される残留電荷成分に比較して、高い交流課電電圧で放出される残留電荷成分の減少が、破壊試験後の試料では大きいと言える。このことは、高い交流電圧を課電しなければ放出

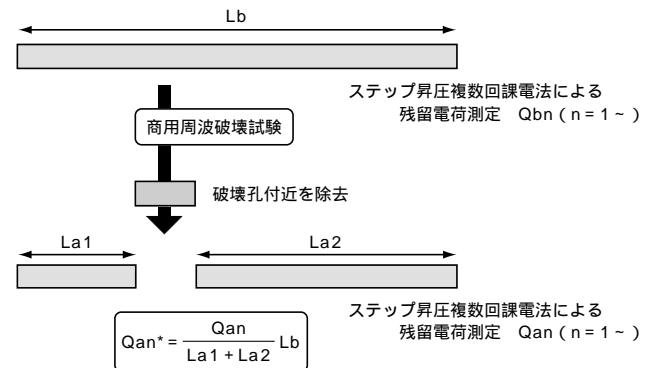


図9 破壊試験前後での残留電荷量分布の変化検討実験
Experimental procedure for investigating the change of residual charges

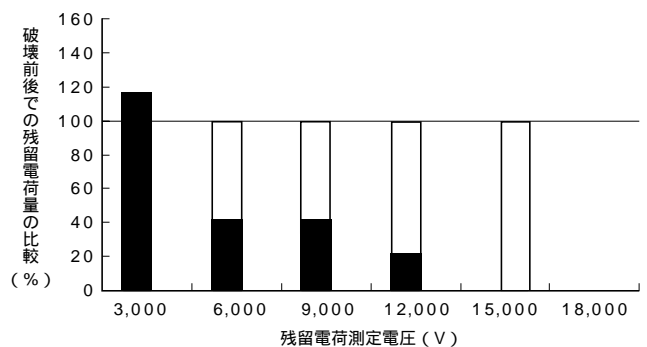


図10 破壊試験前後での残留電荷量の変化
Change of residual charges

されない残留電荷成分が、破壊孔付近に多く含まれていたことを意味するものと考えられる。同様な傾向は試料1においても得られている。

図11に6.6kV～77kV級CVケーブルにおける最大水トリー長と破壊電界強度との関係を示す。破壊電界強度と最大水トリー長は強い相関関係を示すことがわかる。これらを考慮すると、高い交流電圧を課電しないと放出されない残留電荷成分は、長い水トリーの存在の有無を反映していることが示唆される。

前節までの検討結果および本節での結果より、常時対地電圧以下の範囲で、ある高い交流電圧で残留電荷が放出されるか否かを評価することにより、長い水トリーの存在の有無、つまり劣化診断が行えることが示唆される。

3.4 残留電荷放出最高交流課電電界強度と交流破壊電界強度との関係

前節までに、残留電荷が検出された最も高い交流課電電圧を用いることにより、長い水トリーの存在の有無を判定することが可能であることが示された。22, 33kV級の経年劣化CVケーブルにおいて、ステップ状に複数回課電する残留電荷測定法により、残留電荷が放出される最高の交流課電電界強度（Er）に対する交流破壊電界強度（Ebd）との関係を図12に示す。Erが高くなるほどEbdは低くなり、両者の間には良い相関が見られる。よって、

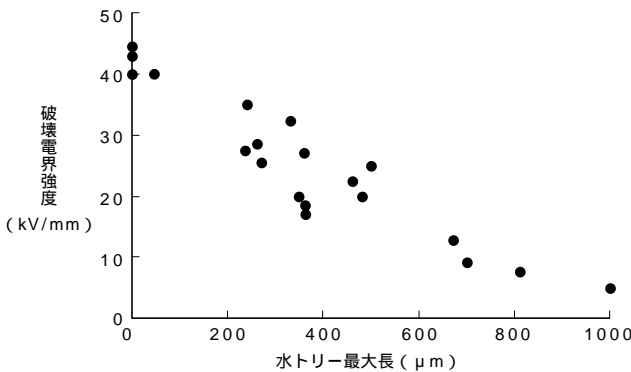


図11 最大水トリー長と破壊電界強度
Correlation between the longest water tree and AC breakdown strength

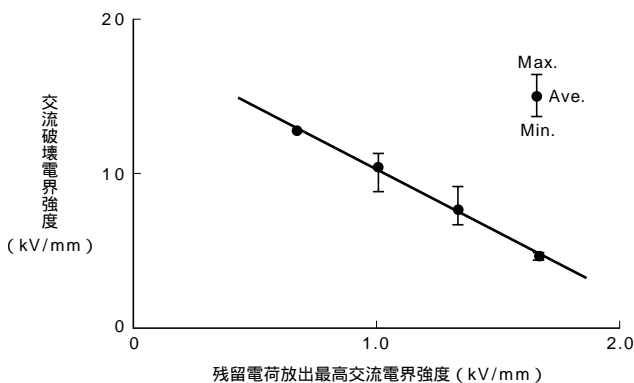


図12 残留電荷放出最高交流電界強度と破壊電界強度の関係
Correlation between maximum field strength at which residual charge is detected and AC breakdown field strength

Erが劣化の指標として有効であることが確認される。

この手法により得られたErは、残留電荷が検出された交流課電電圧（電界強度）を劣化の指標として用いるために、基本的にケーブル長に依存しない手法であり、従来の残留電荷測定法に比較して適切な劣化診断が可能であると考えられる。

4. 実線路における測定

これまでの検討結果より、新規に開発した残留電荷測定法の有効性が示された。これらの検討結果をふまえ、中部電力株式会社殿管内、豊田静岡伊勢丹線（22kV、巨長1,178m）において、実線路における残留電荷測定を実施した。測定条件を表3に示す。

4.1 測定結果

各相において測定された残留電荷量分布を図13に示す。いずれの相においても、残留電荷量分布は6kV程度の交流課電電圧において最も多くなる分布となっており、劣化程度としてはかなり進行しているものと考えられる。また、試験の都合上、9kVまでの課電での評価となるが、各相における残留電荷分布から、赤相においては、9kV以上の交流課電電圧においても残留電荷が検出される可能性があること判断できることから、劣化程度としては赤相が最も劣化程度が大きいと診断される。

残留電荷測定後に中部電力殿により実施された耐压試験の結果、赤相のみ破壊に至り、診断された結果と整合性があることが確認された。また、耐压試験時の破壊箇所付近の撤去ケーブル試料における商用周波破壊試験の結果は30kVであり、かなりの劣化が進行していたものと

表3 実線路測定条件
Measurement conditions for field test

No.	項目	条件
	直流課電電圧	- 30kV/5min
	接地	1min
	交流課電電圧	3kVステップ 昇圧 : 1kV/s 保持時間 : 60s 降圧 : 5s

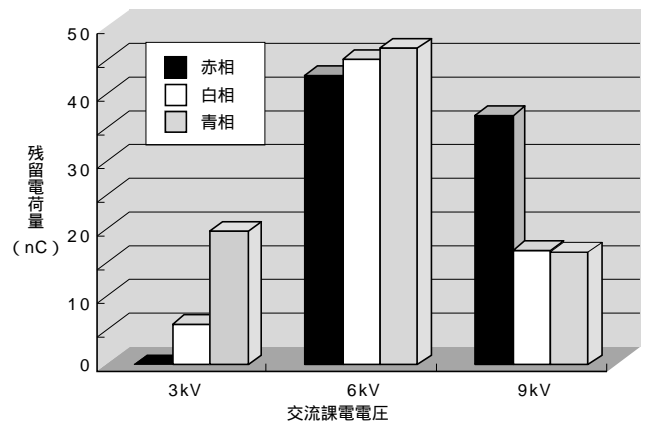


図13 実線路における残留電荷測定結果
Result of field test

表 4 残存破壊電界強度の推定値（従来手法と新規手法との比較）

Results of inference of breakdown field (Comparison between conventional method and proposed method)

全残留電荷量を用いた場合の評価結果		単位長さ当たりの残留電荷量を用いた評価結果		新規手法を用いた評価結果	
マスター曲線からの推定	0.9kV/mm	マスター曲線からの推定	15.6kV/mm	マスター曲線からの推定	6.2kV/mm
実破壊試験結果	5kV/mm	実破壊試験結果	5kV/mm	実破壊試験結果	5kV/mm

考えられる。

4.2 残存破壊性能の推定

以下に、残留電荷測定で得られた結果より、対象ケーブルの残存破壊性能の推定を行う。推定結果を表4に示す。表は、全残留電荷量、単位長さ当たりの残留電荷量および新規残留電荷測定法により評価される結果を示した。黒丸にて示した結果は短尺ケーブルにおいて得られているデータである。なお、実破壊電界強度は、耐圧試験にて破壊した近傍の試料における商用周波電圧破壊試験の結果を絶縁体厚さで除した値である。

全電荷量により推定される残存性能は実破壊電圧値より小さいばかりか、運転電圧より低い値となり、非合理的である。また、単位長さ当たりに換算した残留電荷量から推定される残存破壊電圧値は実破壊電圧より大きな値となり、診断としては不適切であると考えられる。一方、新規手法による診断結果は、実破壊電界強度が5kV/mmであるのに対して6.2kV/mmとなり、極めて近い結果を導き出している。

全残留電荷量あるいは単位長さ当たりに換算した残留電荷量により推定される残存破壊電界強度が、実破壊電界強度に比較して大きく異なっている原因は、供試ケーブルにおいて水トリー劣化が一様でないことを示しているものと考えられる。このように、従来の手法では、長尺ケーブルの劣化診断を行う場合には、その結果はケーブル長に依存し、特に一様な劣化形態でない場合に顕著である。

一方で、新規残留電荷測定法は、残留電荷量を劣化指標の対象とはせず、どの程度の交流電圧で残留電荷が検出されたか否かが劣化指標である。このため、局所的に極度な劣化が存在する場合にも、ケーブル長に依存しな

い適切な劣化診断が可能であることが、今回の実線路測定において検証された。

5.むすび

交流電圧を常時対地電圧以下の範囲でステップ状に複数回課電する新規残留電荷測定法に関して、その手法を説明し、その有効性の検証を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 本手法により得られる残留電荷分布は水トリー分布を反映していることを見出した。
- (2) 本手法により得られる残留電荷量分布の中で、高い交流課電により放出される残留電荷成分は、破壊現象に影響をおよぼす長い水トリーの存在の有無を反映している可能性があることを見出した。
- (3) 本手法による残留電荷測定において、残留電荷が放出される最高の交流課電圧（電界強度）は、ケーブル長に依存しないことから、水トリー劣化診断の指標として有効であることを確認した。
- (4) 実線路において新規残留電荷測定法の検証を実施し、本手法が長尺ケーブルにおける劣化診断に対して極めて有効であることを検証した。

参 考 文 献

- 1) 今ほか：CVケーブルの残留電荷測定法による劣化診断，電気学会誘電・絶縁材料研究会資料 DEI-01-43，2001
- 2) 池田ほか：CVケーブルの水トリー劣化診断法，電力中央研究所報告 研究報告：W86008，1986
- 3) 今ほか：CVケーブル絶縁診断法に関する基礎検討，電気学会誘電・絶縁材料研究会資料 DEI-98-84，1998