

## 레이저 계측에 의한 맞대기 용접부의 스트레인 측정

성백섭\*, 차용훈\*\*, 박창언\*, 김일수\*, 김덕중\*\*\*, 이연신\*\*\*\*, 손준식\*

\*목포대학교 기계선박해양공학부, \*\*조선대학교 기계공학부

\*\*\*동아인재대학 자동차과, \*\*\*\*송원대학 자동차과

## The Strain Measurement of Butt Welded Zone by the Laser System

Back-Sub Sung, Yong-Hoon Cha, Chang-Eun Park, ill-Soo Kim, Duck-Joong Kim,  
Youn-Sin Lee, Joon-Sik Son

### ABSTRACT

Currently knowledge of strain in welds has mainly been obtained from strain gaging method; that is directly attaching most of the material to the gage. The very few non-contact method are still in the early stage. One of the non-contact methods is by the use of the laser that has high-level of the accuracy for the measurement, and this laser also has excellent characteristics on which many studies for its applications are focused throughout the many fields.

The dissertation is on the measurement of the strain caused by the characteristics and the temperature changes of the TIG welded zone which is used with 3D ESPI system that is functionally modified through the laser ESPI system. This system employed the aluminum sheet-metal which are mainly used for the steel plate such as for the electronics, chemistry, food instrument and electronic appliances.

**Key Word** : Non-contact method(비접촉방법), ESPI (전자처리스펙클간섭), TIG(Inert Gas Tungsten Arc Welding)

### 1. 서론

최근 각종 구조물에 사용되는 판재는 구조 전체의 치수에 비해 상대적으로 박판이 되는 경향이 있으며, 이들 판재에 대해 사용조건이나 하중조건도 점차 다양해지고 있으며, 신소재의 개발과 함께 산업 전반에 걸쳐 이러한 소형화, 경량화와 함께 고강도화의 요구에 부응하여 사용이 늘어나고 있는 형편이다<sup>(1-2)</sup>.

신소재들을 산업적으로 응용하기 위해서는 그 재질의 인장, 압축에 대한 변위 측정과 고온상태에서의 열변형 측정 등이 필요하다. 그러나 재료에 센서를 직접 부착하여 측정하는 스트레인 게이지법 수준에 머물고 있는 실정이다<sup>(3-5)</sup>. 레이저는 산업분야에 널리 이용되고 있으며, 단색성, 가간섭성, 지향성 및 집속성이 좋고, 에너지의 공간적, 시간적 집중, 짧은 펄스광의 발생이 가능하다는 특징이 있다<sup>(6-7)</sup>. 레이저 응용은 주로 이러한 성질을 이용한 것들이며 눈부신 발전을 하였으며 매우 넓은 범위를 포함하고 있다. 응용분야도 오늘날 광통신, 계측, 정보처리, 분광, 광디스크, 광전자기기, 재료 가공 등 각방면에 걸쳐 급속히 확대되어가고 있으며, 레이저를 이용하여 용접부의 스트레인 측정에 응용할 필요성이 대두되고 있다<sup>(8-10)</sup>.

최근에 레이저광의 우수한 성질을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있으나 많은 분야에서 레이저를 이용한 새로운 기술이 필요하다. 실험에만 머무

르는 레이저 응용계측의 한계성을 실생산라인에 응용하여 적용성 여부를 시도하고자 하였다. 현재 생산되어 시판되고 있는 박판 알루미늄을 사용 TIG 용접함으로서 전체중량 줄이고, 생산단가를 낮출 수 있어 많이 이용하고 있다. 그러나 완제품이 되기까지는 많은 공정을 거치는데 불량률이 판금 용접부에서 많이 발생하여 이를 보완해야 할 필요성과 문제점이 현장에서 제기 되었다.

따라서 실 생산라인에서 TIG 맞대기 용접한 시험편을 발취하고, 레이저 응용계측 3D ESPI 시스템과 스트레인게이지로 용접부의 스트레인을 비교 측정하였다.

## 2. 면내변위 계측이론

스페클 패턴 간섭법은 집속성이 우수한 광원을 바탕으로 형성된 광학계를 구성하여 가간섭적으로 물체광과 참조광을 합성시킴으로서 물체의 변위량에 따라 발생하는 간섭패턴의 줄무늬를 산출하는 방법이다. 여기서 사용된 스페클은 빛의 휘도 분포로써 물체 변위에 대한 중요한 위상정보를 갖게되며 그 위상값은 CCD카메라와 화상처리 장치를 통해 변위의 정보로 바뀌게 된다.

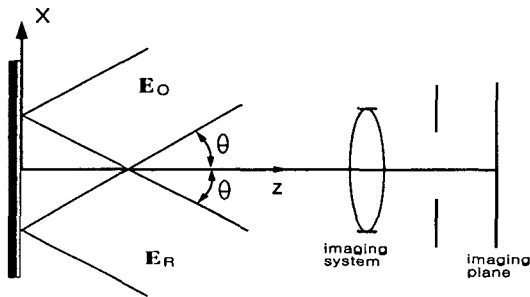


Fig. 1 In-plane displacement sensitive ESPI

이러한 방법을 총괄하여 전자처리 스페클 간섭법이라 한다.

Fig. 1은 면내변위에 민감하도록 구성된 스페클 간섭계로서 확산된 물체광과 참조광은  $\theta$ 의 기울기로 동일하게 조사되어 물체표면에서 진폭의 값으로 광의 위상변화를 전달한다.

면내 변위 측정에서는 두 개의 레이저광( $L_1, L_2$ )이 물체에 조사가 되어진다. 한쪽은 다른 한쪽의 참조광이라고 할 수 있으며, 변위  $u$ 에 대한 변형 전후의 광로길이의 변화  $\Delta$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta = L_1 - L_2 = 2u \cos \theta \quad (1)$$

여기에서  $\theta$ 는 시험편에 입사되는 레이저 광의 조사각이며, 광로길이 변화  $\Delta$ 는  $n\lambda$  ( $n=1, 2, 3 \dots$ )가 될 때, 간섭 줄무늬를 형성하기 때문에 줄무늬 차수를  $n$ , 레이저 파장을  $\lambda$ 로 하면, 변위  $u$ 와의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u = \frac{n\lambda}{2 \cos \theta} \quad (2)$$

결국 변위  $u$ 는 레이저의 파장과 레이저 광의 조사각만으로 결정됨을 알 수 있다.

## 3. 실험

### 3.1 시험편

실험에 사용된 재료는 알루미늄 Al-1234H12이고 두께가 1.0 mm로 김치냉장고 내부에 사용하고 있는 재질이다. 재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 3.1과 Table 3.2와 같다.

Table 1 Chemical compositions of base metal ( wt. % )

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
0.198	0.65	0.05	0.05	0.05	0.10	0.06	99.35

Table 2 Mechanical properties of base metal

Tensile strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
98	89.18	24

용접시 용접부의 역학적 조건 및 시험편이 수축, 팽창을 받지 않는 무한평판의 최소 크기로 선정하였으며, 용접을 하고자 알루미늄판을 300 mm×200 mm의 크기로 하여 제작하였으며 150 mm×50 mm인 인장 시험편을 제작하였다. 또한 스트레인 게이지를 용접 비이드부를 경계로 일정한 간격 5mm, 15mm, 25mm, 35mm으로 부착하여 스트레인 변화를 측정하고자 하였다.

Fig. 2는 지그로서 체결한 상태를 보여주는 그림이다. 체결시 시험편의 측면에서 일직선이 되도록 용접시 구속한 상태로 용접을 하였기 때문에 실험시 발생하는 오차의 원인을 최소화 하였다.

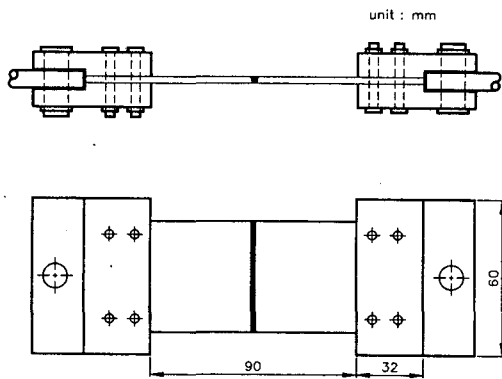


Fig. 2 The configuration of grip in tensile testing

Table 3은 맞대기 용접시험편의 용접조건을 보여주는 표로서 실 생산라인에서 많은 검증을 통하여 적용한 용접조건이다.

Table 3 Welding conditions of butt welding

Thickness (mm)	Current (A)	Voltage (V)	Pulse (Hz)	Ar gas flow (l/min)
1	115	20	95	15

### 3.2. 시스템 구성

Fig. 3는 3D ESPI 센서의 내부 구성도를 나타

낸 그림이고, Fig. 4는 ESPI 장치의 전체 시스템 구성도를 도식적으로 나타낸 그림이다.

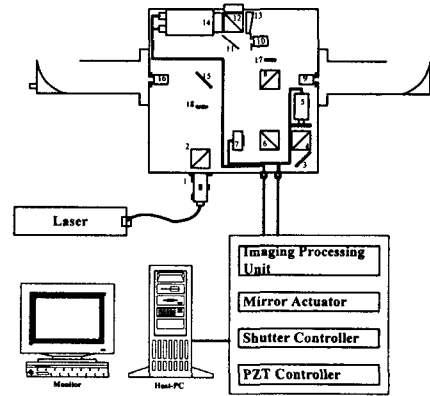


Fig. 3 Schematic diagram of three-dimensional E SPI system

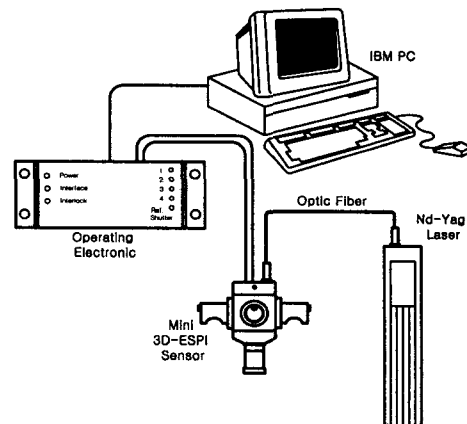


Fig. 4 Schematic diagram of total ESPI system employed

Electronic 장치는 화상을 위상이동 시키기 위한 장치이며 PZT에 전기적 신호로 보내 위상을 이동시킨다. 컴퓨터에는 Frame Grabber 카드가 설치되어 화상의 입력과 계산을 수행하여 얻고자 하는 화상을 모니터를 통하여 2차원과 3차원 그래프로 보여주며, 화상을 처리하여 변형 값과 스트레인을 정량적으로 보여주는 역할을 한다.

### 4. 실험결과 및 고찰

Photos 1~6에서는 알루미늄판재의 맞대기 용접한 시험편을 3D ESPI 시스템으로 줄무늬를 측정하고 용접부에 스트레인의 높은 상태를 보기 위하여 3차원적으로 본 그림이다. 그 결과 고하중에 따른 맞대기 용접부 시험편에서 중앙부의 위치에 스트레인이 높았음을 사진으로 알 수 있었다. 사진에서 고하중시 용접부위에 스트레인 변화가 현저히 높아 용접부에서 스트레인이 매우 높았음을 알 수 있다. Table 4은 하중에 따른 스트레인 실험값을 ESPI와 스트레인 게이지의 비교치를 도표화 한 것으로서 실험에 있어서 하중을 108 N, 127 N, 147 N, 167 N, 186 N, 206 N의 5종류로 하였다. Figs. 5~10은 스트레인 게이지 부착 위치가 맞대기 용접한 시험편의 중앙선에서 5 mm, 15 mm, 25 mm, 35 mm 떨어진 곳과 비교하기 위하여 각각의 하중 별로 스트레인의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이 하중이 증가 할 수록 스트레인 변화가 높아짐을 알 수 있다. Fig. 5, 6에서는 스트레인이 5 mm 근처에서 가장 작게 측정되었으며 25 mm에서 가장 크게 스트레인이 측정되었다. 이것은 하중을 초기에 가할 때 응력 집중현상이 시험편을 체결하는 부분에서 약간 작용한 것으로 사료되며, 저하중에서는 스트레인 변화가 용접부에 크게 영향을 미치지 않았다. 용접시 열영향으로 용접부위가 모재부보다 경화되어 스트레인 영향이 크게 미치지 않은 것으로 사료된다. Figs. 7~10에서는 하중이 증가 할수록 스트레인 게이지 5 mm의 근처에서 스트레인 값이 점점 커짐을 알 수 있다. 특히 저하중에서 스트레인 게이지 부착위치 25 mm에서 높게 측정되었던 것이 하중이 증가할수록 용접부 쪽으로 스트레인이 높게 측정되었다. 206 N에서는 스트레인 값이 스트레인 게이지 부착위치 5 mm, 15 mm, 25 mm, 35 mm에서 각각  $196.47 \mu\epsilon$ ,  $129.40 \mu\epsilon$ ,  $113.20 \mu\epsilon$ ,  $109.83 \mu\epsilon$ 으로 측정되었다. 3D ESPI법과 스트레인 게이지 값의 비교결과 저하중시 오차의 범위가 2.6 % 이내 였고, 고하중에서는 오차의 범위가 3 % 정도로 측정되었다.

Photos 7에서는 용접부의 스트레인 변화로 저하중부터 고하중까지 측정된 사진이다. 하중이 증가할수록 용접부에 스트레인이 집중되는 현상을 실시간적으로 관찰할 수 있었다.

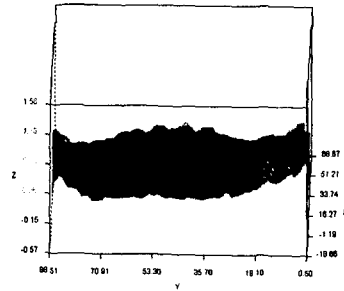


Photo. 1 3D shape of ESPI on the 108 N tension

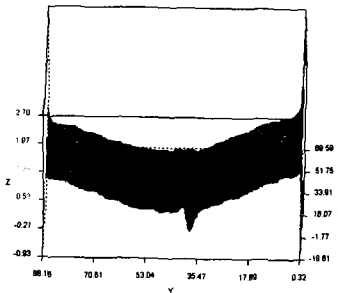


Photo. 2 3D shape of ESPI on the 127 N tension

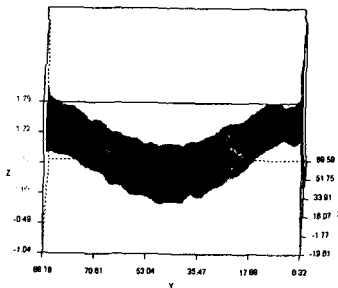


Photo. 3 3D shape of ESPI on the 147 N tension

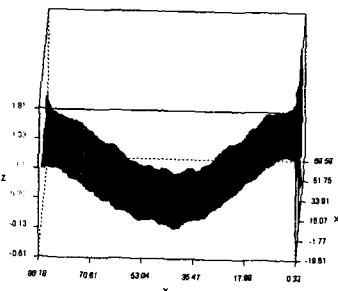


Photo. 4 3D shape of ESPI on the 167 N tension

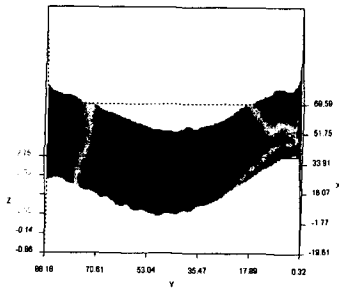


Photo. 5 3D shape of ESPI on the 186 *N* tension

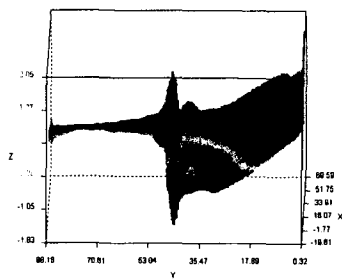


Photo. 6 3D shape of ESPI on the 206 *N* tension

Table 4 Comparison of the results of the strain gauge with those of ESPI at the tension of butt welded specimen

	Load ( <i>N</i> )	Method	Strains at the position apart from welded center line ( $\mu \epsilon$ )			
			5 mm	15 mm	25 mm	35 mm
1	108	ESPI	43.34	61.36	65.92	58.78
		GAGE	42.73	60.47	64.72	57.39
2	127	ESPI	60.23	69.65	74.35	68.77
		GAGE	59.03	68.07	72.83	67.13
3	147	ESPI	80.21	75.60	76.82	72.04
		GAGE	81.72	73.75	75.38	70.46
4	167	ESPI	120.74	82.03	83.56	81.26
		GAGE	122.32	80.37	81.68	79.23
5	186	ESPI	167.37	108.75	98.36	96.37
		GAGE	164.08	106.42	96.57	97.19
6	206	ESPI	205.42	135.40	113.20	109.83
		GAGE	199.46	131.86	110.36	114.08

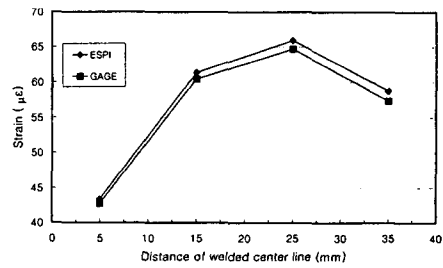


Fig. 5 Measured results from the center line of butt welded specimen on the 108 *N* tension

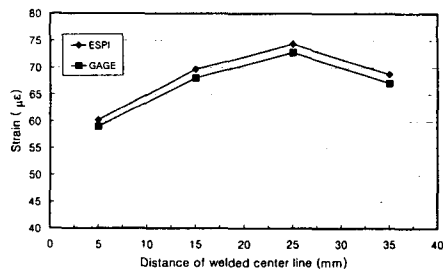


Fig. 6 Measured results from the center line of butt welded specimen on the 127 *N* tension

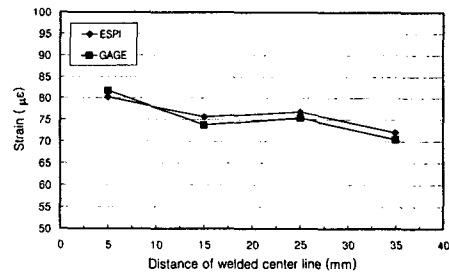


Fig. 7 Measured results from the center line of butt welded specimen on the 147 *N* tension

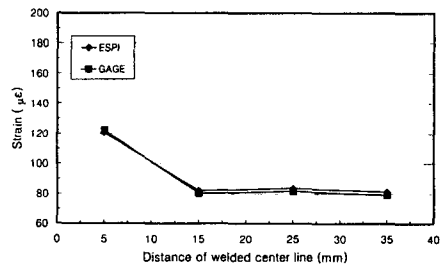


Fig. 8 Measured results from the center line of butt welded specimen on the 167 *N* tension

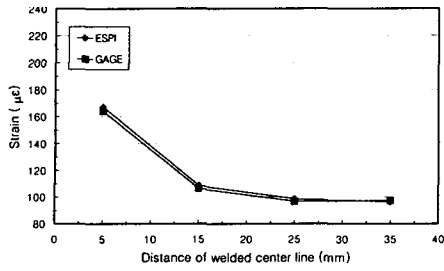
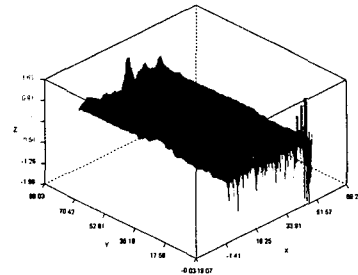


Fig. 9 Measured results from the center line of butt welded specimen on the 186  $N$  tension



(c) [ 147  $N$  ]

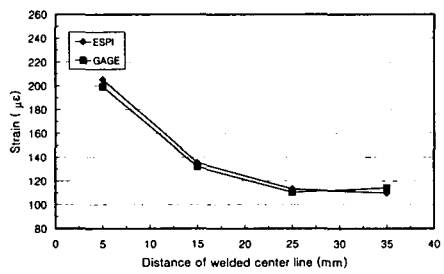
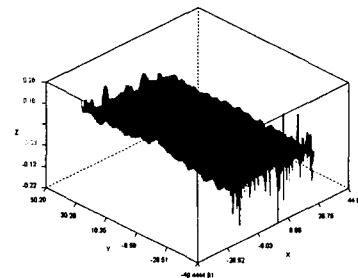
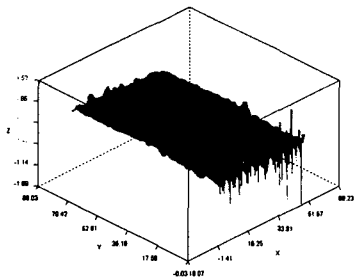


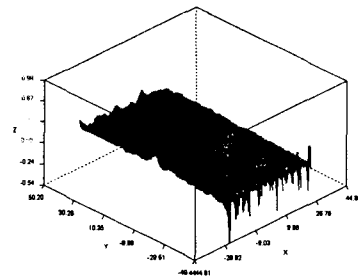
Fig. 10 Measured results from the center line of butt welded specimen on the 206  $N$  tension



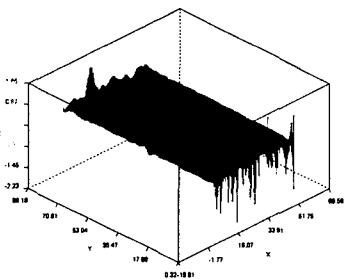
(d) [ 167  $N$  ]



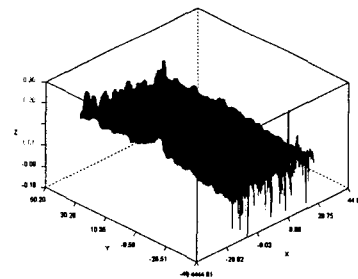
(a) [ 108  $N$  ]



(e) [ 186  $N$  ]



(b) [ 127  $N$  ]



(f) [ 206  $N$  ]

Photo. 7 Strain concentration of butt welded specimen on the tension

## 5. 결 론

알루미늄 맞대기 용접부를 레이저를 이용하여 3D ESPI 시스템으로 스트레인을 측정하고, 게이지를 사용한 스트레인 값을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 용접시험편에 대한 ESPI와 스트레인 게이지에 의한 스트레인을 비교한 결과 스트레인의 정량적인 측정을 실시간적으로 수행할 수 있었다.

(2) 실험오차의 범위가 저하중시 2.6 % 이내였고, 고하중에서는 3%로 측정되었어 정밀 측정이 가능함을 확인할 수 있었다.

(3) 용접시험편을 ESPI와 스트레인 게이지 실험법의 비교결과 저하중에서는 스트레인이 모재부와 용착금속부에서 차이가 크지 않았으나 고하중으로 증가함에 따라 스트레인이 용착금속부 쪽으로 점차 증가하였다.

## 참고문헌

1. Cha, Y.H., Bang, H.S., Oh, Y. K., Ro, C. S. and Kim, J. M. "Numerical Analysis is of Post Welding Heat Treatment Base on the Thermal", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol.11, No.1, pp. 113-123, 1997.
2. Cha, Y. H., Sung, B. S. and Kim, D. J., "A Study on the In-Plane Displacement Measurement of Spot Welded Joints by Electronic Speckle Pattern Interferometer Method", The Korean Society of Machine Tool Engineers, pp. 48-53, 1997.
3. 백성훈, 김철중, "실시간 홀로그래픽 간섭법을 이용한 압력용기의 내부결함 측정법", 95 추계 학술대회논문집( I ), pp. 53-58.
4. Yang, S. P., "A study on the Vibration Behavior of Composite Laminate under Tensile Loading by ESPI", 2000.
5. David L. Andrews, "Lasers in Chemistry", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1990.
6. Rastogi, P. K.. Holographic Interferometry - Principles and Methods: Springer Series in Optical Sciences, Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, Vol.68, 1994.
6. Rastogi, P. K., "Holographic Interferometry Principles and Methods" , Springer-Verlag, pp. 2-316, 1994.
8. Kershisnik, D.P., "High Temperature Strain Gage Techniques on Graphite", The Society for Experimental Stress Analysis Spring Meeting, Los Angeles, California, May 1973.
9. Hannah, R. L. and Reed, S. E., "Strain Gage Users' Handbook" Elsevier Applied Science Society for Experimental Mechanics, Inc. 1992.
10. 韓應, "스트레인 게이지 理論과 應用", 普成文化社, 1993.