

超音波パルスの可視化試験装置の開発

偏光シュリーレン法装置の開発試験(1)

1986年12月

動力炉・核燃料開発事業団
大 洗 工 学 セ ン タ ー

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

超音波パルスの可視化試験装置の開発

偏光シュリーレン法装置の開発試験(1)

谷本健一* 伊達和博** 菊池 皓*
佐藤 稔*

要 旨

超音波探傷試験における欠陥の検出や欠陥の性状を評価する際は、超音波探傷試験に使用する超音波探触子から放射された超音波パルスの音場や超音波パルスの波形等に関する性能を知る必要がある。

超音波探触子の性能評価法として、今までは、水中の超音波パルスはシュリーレン法装置で、固体モデル中の超音波パルスは光弾性実験法装置で別々に行っていた。水浸型超音波探触子や直接接触型超音波探触子などの総合的な性能評価や検定などを行うことができなかった。

この問題を解決するために、シュリーレン法と光弾性実験法の両方の特徴を応用して、水中と固体モデル中の超音波パルスを同時に可視化できる、偏光シュリーレン法を考案した。偏光シュリーレン法の原理に基づき、2面対向法のシュリーレン法装置と偏光板および偏光板製ナイフエッジを組み合わせた偏光シュリーレン法装置を試作開発した。

偏光シュリーレン法装置で、観測用の水槽内に配置したパイレックスガラス製の固体モデルを水浸探傷法で探傷して、その際の超音波パルスが水中と固体モデル中で同時に可視化できることの確認と、可視化像から超音波パルスを定量的に測定することができる可能性について試験した。

試験の結果、水中と固体モデル中の超音波パルスが同時に可視化でき、可視化像から水中、水中と固体モデルの境界部、固体モデル中の超音波パルスの音圧分布、方向、周波数、波動モード等が定量的に測定できる見通しを得た。今後は、偏光シュリーレン法装置の機能性能の向上試験と改良等を図って行く計画である。

* 大洗工学センター 機器構造開発部 新型転換炉機器開発室

** 大洗工学センター 機器構造開発部 新型転換炉機器開発室 非常勤嘱託
(宮城工業高等専門学校 機械工学科)

Dec. 1986

Development for Visual Test Equipment of the
Ultrasonic Pulse Waveform

Development and Test Result of Polarized Light
Schlieren Method Equipment (1)

K. Tanimoto*, K. Date**,
A. Kikuchi*, M. Sato*

Abstract

It is necessary for detecting and characterizing the defects with ultrasonic non-destructive testing to know the characteristics of the sound field and the pulse waveform transmitted by a ultrasonic probe.

As a visual measuring technique relating the ultrasonic pulse waveform and sound pressure field generated by the probe, schlieren method for the wave in water and photo-elastic method for the wave in solid were used separately. Since there is a difficulty to observe simultaneously the sound field in the water and the solid by each method respectively, various types of the probe, such as a immersion type probe which is widely used in ultrasonic testing, cannot be evaluated and authorized the overall performance of the probe.

To remove this difficulty, we have developed the polarized light schlieren method, which is combined the schlieren method with the photo-elastic method, for the visualization of ultrasonic pulses in both water and solid simultaneously. Following the principle of the polarized light schlieren method, we have made the visual test equipment having two concave mirrors, a polarizer and a knife edge made by polarizer film. Using this equipment, we have examined the performance and the possibility of the quantitative measurement of ultrasonic wave from the visual images.

* ATR Components Development Section

** ATR Components Development Section, Parttime Researcher
(Miyagi National college of Technology)

travelling directivity, frequency and wave mode of ultrasonic wave by using the polarized light schlieren method.

In the future, we intend to improve the performance of our equipment and visualize the various ultrasonic wave behavior, especially liquid and solid interface.

From the test results of this equipment, it is confirmed that ultrasonic wave in both water and transparent solid model, made by pyrex glass, is visualized simultaneously through the window of the water tank, and it is suggested that it can be evaluated quantitatively the sound pressure field,

目 次

1. 緒 言	1
2. 超音波パルスの可視化装置の原理	3
2.1 偏光シュリーレン法	3
2.2 超音波パルスの静止画像観察方法	4
3. 超音波パルスの可視化試験装置	5
3.1 偏光シュリーレン法装置	5
3.2 超音波パルスの可視化試験方法	7
4. 試験結果と考察	8
5. 結 言	11
6. 参 考 文 献	12

付 録

1. シュリーレン法の原理	23
2. 光弾性実験法の原理	33
3. シュリーレン法装置	41
4. 超音波パルスの可視化装置の原理と基本光路	51
5. ナノパルスライト	57
6. 偏 光 板	65
7. 超音波パルスの可視化像	69

図 表 目 次

表 3. 1	各種ガラス材料の音速と光弾性定数
図 2. 1	偏光シュリーレン法装置の構成
図 2. 2	偏光板製ナイフエッジ
図 2. 3	超音波パルスの静止画像観察方法
図 3. 1	偏光シュリーレン法装置
図 3. 2	偏 光 板
図 3. 3	偏光板製ナイフエッジ
図 3. 4	偏光シュリーレン法装置の配置
図 3. 5	試 験 片
図 4. 1	偏光シュリーレン法装置による超音波パルスの可視化像

付 図 表 目 次

付表 2. 1	シュリーレン法装置の仕様
付表 6. 1	Spectral Values - HN32
付図 1. 1	シュリーレン法の基本的構成
付図 1. 2	ナイフエッジ部詳細
付図 1. 3	ナイフエッジと光量
付図 1. 4	2 個の凹面鏡を用いた一般的なシュリーレン法
付図 1. 5	凹面鏡を用いた反射式シュリーレン法
付図 1. 6	ナイフエッジ
付図 1. 7	シュリーレン法装置の構成
付図 2. 1	主応力 σ_1 および σ_2 と相対的光路程差 J の関係
付図 2. 2	直交平面偏光器の原理
付図 2. 3	偏 光 板
付図 2. 4	光弾性実験法装置の構成
付図 3. 1	シュリーレン凹面鏡 No. 1
付図 3. 2	シュリーレン凹面鏡 No. 2

付図 3.3	容 量 セ ル
付図 3.4	配 置 方 法
付図 3.5	試 料 の 配 置
付図 3.6	焦 点 位 置
付図 3.7 (a)~(d)	配 置 調 整 図
付図 4.1	偏光シュリーレン法の基本光路
付図 4.2	シュリーレン法の基本光路
付図 4.3	光弾性実験法の基本光路
付図 5.1 (a)(b)	ナノパルスライト本体
付図 5.2	ランプハウス
付図 6.1	Spectral Curve - HN32
付図 7.1 (a)~(c)	偏光シュリーレン法装置による超音波パルスの可視化像
付図 7.2 (a)~(d)	偏光シュリーレン法装置による超音波パルスの可視化像
付図 7.3 (a)(b)	偏光シュリーレン法装置による超音波パルスの可視化像
付図 7.4	シュリーレン法装置による超音波パルスの可視化像
付図 7.5	光弾性実験法装置による超音波パルスの可視化像

1. 緒 言

新型転換炉の供用期間中検査については、現在各種方法の開発が進められ、かつその高度化が図られている。⁽¹⁾

プラントの機器材料等の健全性および欠陥の性状等を確認する非破壊試験の主力のひとつとして、超音波探傷試験がある。⁽²⁾⁽³⁾ 超音波探傷試験は、超音波探触子（以下に「探触子」と言う）を①直接被検材に当てて被検材に超音波パルスを入射させ、欠陥の有無および欠陥の性状等を調べる直接接触探傷法と、②水を媒体にして、被検材に超音波パルスを入射させ、欠陥の有無および欠陥の性状等を調べる水浸探傷法がある。

水浸探傷法を用いて複雑な形状の被検材の超音波探傷を行う場合、水中と被検材中の超音波パルスの音場や波形などの挙動に関する知識に精通していないと、欠陥を見おとすようなことがおきる。

探触子から放出される超音波パルスの音場や超音波パルスの波形は、①実際の被検材に付けた横穴、縦穴、スリット欠陥あるいは水中の球などの微小反射体からの反射波を測定して調べる方法と、②類似した固体モデルを用いて、固体モデルの中を伝播する超音波パルスを可視化して測定する方法⁽⁴⁾がある。

微小反射体を使用する方法は、被検材と同じ材料を用いて手軽に測定できる利点があるが、反射体には著るしい超音波の周波数特性があり、入力波形で反射波形も変化する欠点があるために詳細な測定はできない。

シュリーレン法や光弾性実験法で超音波パルスを可視化して測定する方法は、超音波パルスの波形や波形上の音圧分布等を詳細に測定できるために有効である。現在超音波パルスを可視化するためには、閃光時間の短いストロボを光源とした、シュリーレン法装置あるいは光弾性実験法装置が用いられている。しかしシュリーレン法装置は、水中の超音波パルスに対して可視化の感度が高く詳細な解析が可能であるが、固体モデル中では感度が低く適用することが難しい。光弾性実験法は、固体モデル中の超音波パルスのみを高感度に可視化でき定量評価が可能であるが、水中の超音波パルスは水中では剪断応力がかからないために、原理的に可視化することができない。

このために、水浸型探触子の超音波パルスの音場測定等は、いずれかの方法のみでは水中と固体モデル中の超音波パルスを総合的に評価することができない。

以上のことから、水浸型探触子を含めた種々のタイプの探触子の超音波パルスの総合的な音場と超音波パルスの波形などの性能評価および検定などを行うために、シュリーレン法と光弾性実験法の両方の特徴が同時に利用できる手法とその装置の開発が望まれていた。

本研究では、探触子から放出された超音波パルスの音場と波形等を、①水中ではシュリーレン法で、②被検材（被検材を模擬した固体モデル）中では光弾性実験法を適用して、水中と固体モデル中の超音波パルスを同時に可視化でき、かつ定量的に超音波パルスを測定することのできる「偏光シュリーレン法」を考案した。

固体モデルは透明体（パイレックスガラス等）で、超音波に関する特性が実際の被検材に類似した材料で製作して使用することにより、被検材中での超音波パルスの音場特性や超音波パルスの波形に関する性能評価が可能である。

本研究で考案した「偏光シュリーレン法装置」は探触子の性能評価と検定、探傷目的に合った探触子の選定と配置方法、走査ピッチの決定、新型探触子の開発などに利用でき、超音波探傷試験の精度向上と信頼性向上に貢献できる。また、水中と固体モデル中の超音波パルスが同時に可視化像として観察できることから、超音波探傷技術者の教育や技能向上等の目的のためにも利用することができ、目に見えない超音波パルスの挙動を理解させる上で最も効果的であると考えられる。さらに、液－固体系内での圧力波の挙動に関する問題解決にも利用可能であり、広い応用が期待できる。

本報告は、本研究で考案した水中と固体モデル中の超音波パルスを同時に可視化する「偏光シュリーレン法」の原理と、原理に基づいて開発した「偏光シュリーレン法装置」を紹介し、装置の実用化のための機能性能確認試験の結果について述べたものである。

なお、本開発試験の名称をPOLARIS（Polarized Light Schlieren）と呼ぶ。

2. 超音波パルスの可視化装置の原理

2.1 偏光シュリーレン法

水中と固体モデル中の超音波パルスを同時に可視化する方法は、付録1に示すシュリーレン法の原理⁽⁵⁾⁽⁶⁾と、付録2に示す光弾性実験法の原理⁽⁷⁾⁽⁸⁾を組み合わせ、以下の方法で水浸探傷時の超音波パルスの可視化像を得ることができる。

液体は圧力が加わると密度変化を生じる、シュリーレン法は液体中の密度差による光の屈折率の違いを利用して、密度変化の分布像を遮光用のナイフエッジを介して投影面上に結像させ、液体内の圧力分布を知るものである。他方、固体は応力の歪変化による偏光角度の差を利用して、偏光板を介して歪変化の分布像を投影面上に結像させ、固体中の応力分布を知るものである。これらの2方法のいずれかのみでは、測定機構の違いから同時に同一投影面上に液体内圧力と固体内応力の分布像を結像させることは困難であった。

考案した「偏光シュリーレン法」は、光源に偏光板を用い、シュリーレン法の遮光用のナイフエッジ部分を偏光板製ナイフエッジ（光源の偏光角度と直角の方向）に置き換えて、液体中の密度差分布はシュリーレン法で、固体モデル中の歪分布は光弾性実験法で、それぞれの像を同時に同一投影面上に結像させて、液体内圧力と固体モデル内応力を評価しようとするものである。「偏光シュリーレン法装置」の原理的構造について以下に説明する。

偏光シュリーレン法装置は、付録3に示す2個の凹面鏡を用いたシュリーレン法装置⁽⁹⁾を応用したもので、図2.1に示す通りピンホール③の後ろに偏光板④を置き、図2.2に示す偏光板製ナイフエッジ⑨を従来のナイフエッジの位置に配置したものである。

ここで、まずピンホール③の後ろに偏光板④を置き、観測部⑥に入射する光を偏光にして、偏光板製ナイフエッジ⑨の位置にナイフエッジを配置した場合でも、シュリーレン法の適用には何ら影響を与えず、シュリーレン法の原理がそのまま適要できる。次に、ナイフエッジを偏光板製ナイフエッジ⑨に置きかえて、偏光板④に入射する偏光と直角方向になるように置く（光弾性実験法で言う“暗視野の状態”）ことによっても、本来のナイフエッジの役目を果して、観測部⑥に何も存在しない時には入射光を遮ることができる。

したがって、図2.1に示すように、偏光板製ナイフエッジ⑨によっても、従来と同じシュリーレン法による超音波パルスの可視化を行うことができ、観測部⑥にある水中の超音波パルスはシュリーレン法で可視化することができる。同時に、ガラス試験片⑦中を通った光は屈折率の変化が小さいために、偏光板製ナイフエッジ⑨の上に集まり、ガラス試験片⑦の中に入射した偏光は光弾性効果によって偏光板で作った偏光板製ナイフエッジ⑨を通過することができ、ガラス試験片⑦の中の超音波パルスは光弾性実験法で可視化することができる。

すなわち、観測部⑤に入射する光を偏光にして、ナイフエッジを偏光板で製作することにより、観測部⑥の水槽中の超音波パルスのうち、水中の超音波パルスはシュリーレン法の原理で、ガラス試験片⑥の中の超音波パルスは光弾性実験法の原理で、同時に超音波パルスを可視化することができる。

図 2.2 に示す偏光板製ナイフエッジの光量減少用の偏光板 B は、水中とガラス試験片⑦中の超音波パルスの可視化の際のシュリーレン法と光弾性実験法の感度差による光量バランスをとるために設けたものである。

図 2.1 に示す偏光シュリーレン法装置は偏光板④と偏光板製ナイフエッジ⑨を除き、偏光板製ナイフエッジ⑨の位置に従来のナイフエッジを配置すると一般的なシュリーレン法装置として使用できる。また偏光板製ナイフエッジ⑨を除き、偏光板製ナイフエッジ⑨の位置していた近傍に偏光板を置くと、一般的な光弾性実験法装置として使用できる。

付録 4.1 は上述した「偏光シュリーレン法」の原理と基本光路をまとめたものである。

2.2 超音波パルスの静止画像観察方法

偏光シュリーレン法装置によって、水中と固体モデル中の超音波パルスを同時に可視化する方法を前項で述べた。この超音波パルスの音圧、進行方向、屈折角、周波数、波動モード等を定量的に測定するためには、高速で水中あるいは固体モデル中を伝播している超音波パルスを静止画像としてとらえる必要がある。

超音波パルスの静止画像観察方法は、図 2.3(a)のブロック図に示すように、超音波の発振を制御している同期信号を基に、遅延回路で同期信号に一定の遅延時間を与えてナノパルスライトの閃光開始時刻(t_r)を制御するトリガパルスを作る。

トリガパルスによって、付録 5 に示す閃光時間が 180 nsec という非常に短いナノパルスライト⁽¹⁰⁾を閃光させることにより、図 2.3(b)に示すように、任意の時刻(t_r)の位置における超音波パルスのみを静止画像として可視化することができる。この可視化像を観察して定量的に超音波パルスを測定することができる。

また、遅延時間を連続して可変することにより、超音波パルスの動きをスローモーションとしてとらえることもできる。

3. 超音波パルスの可視化試験装置

3.1 偏光シュリーレン法装置

超音波パルスの可視化試験を行うために、2節で考案した偏光シュリーレン法装置を開発した。開発した偏光シュリーレン法装置の配置図および部分写真を図 3.1 に示す。

(1) 光源部

光源は、閃光時間が短かく、立上り時間が速い菅原研究所製のナノパルスライト型名 NP-1 を使用した。ナノパルスライトの詳細仕様は付録 5 に示す。

ナノパルスライトは、クセノンランプを使用しており、自然太陽光に最も近く、輝度が高く、むらが少く、点光源に近いために白色光源として超音波パルスの可視化試験に適している。

光源部はランプを直接光源とせず、コンデンサレンズでピンホールに光を絞る、そこを光源としてシャープなむらのない光源を作った。

偏光シュリーレン法装置および光弾性実験法装置として使用するための光源部の偏光板は、付録 6 に示すポラロイド社製の HN32⁽¹⁾ を図 3.2 の通り製作して用いた。

(2) シュリーレン凹面鏡

シュリーレン凹面鏡はパイレックスガラスを放物面に仕上げた上に、強化膜としてシリコンを蒸着させたもので、測定範囲は 250mm ϕ 、焦点距離は 2.5 m のものを使用した。

凹面鏡はレンズに比べ光の吸収率が低く球面収差と色収差が少ない利点をもつ。

(3) 受光部

偏光シュリーレン法装置に使うために製作した偏光板製ナイフエッジを図 3.3 に示す。

偏光板製ナイフエッジは、光源部の偏光板と同じ偏光板(HN32)を使って図 2.2 に示す直線形状のものを製作した。偏光板製ナイフエッジの A は本来のシュリーレン法装置用のナイフエッジの役割りを果たすものである。B は A の偏光板の角度よりも約 20 度ずらした方向のものを置き、シュリーレン法で得られる像の輝度を減少させ、シュリーレン法と光弾性実験法による可視化像の輝度のバランスを保つためのフィルタの役目をするものである。偏光板製ナイフエッジはシュリーレン法のナイフエッジと同じように上下、左右、前後に微動できる治具に取付けて使用した。

光軸を一致させるために、偏光板製ナイフエッジとカメラを一体の台の上に配置した。

なお、シュリーレン法装置として使用する場合は、付図 1.6 に示すナイフエッジで光軸をナイフによって両側からカットオフでき、上下、左右、回転、前後の微動ができるものを使用した。また光弾性実験法装置として使用する場合は、従来のナイフエッジを取り除

き、その近傍に光源部に用いた偏光板と同じ付図 2.3(b)に示す偏光板(HN32)を配置した。

(4) 観 測 部

水槽は、水中と試験片中の超音波パルスを可視化するための観察容器である。

水槽の寸法は $H\ 550\text{ mm} \times W\ 550\text{ mm} \times D\ 450\text{ mm}$ で水槽の両側の中央に $250\text{ mm } \phi$ の窓硝子が付いている。窓硝子の材質は BK7, 面精度は $\lambda/4$, 両側の窓の平行度は 2 分以内である。

試験片は、表 3.1 に示すように、音速が縦波で $5,490\text{ m/sec}$, 横波で $3,420\text{ m/sec}$ と鉄鋼材料の音速(縦波: $5,900\text{ m/sec}$, 横波: $3,230\text{ m/sec}$)に近く、ガラス中では最も光弾性感度が高いパイレックスガラスを用いた。

ガラス材料では、斜角探触子の使用も考慮すると、横波の速度が最も鋼に近く光弾性定数の大きいパイレックスガラスが最も良い可視化像が得られた。

パイレックスガラスは、 $H\ 100\text{ mm} \times W\ 100\text{ mm} \times D\ 20\text{ mm}$ の板状のもので、平行平坦度は $1\ \mu$ 以下とし、十分な焼純を行ない、板厚面は光学研磨を行ったものを使用した。

なお、試験片の材料選定に当っては、他のガラス材料およびアクリルやエポキン樹脂等でも可視化を試みたが、樹脂材料の場合は、光弾性感度はガラスに比べて高いものの弾性率が小さいために圧電素子を用いる超音波探触子では十分な強度をもつ弾性波を試験片中に発生させることはできなかった。⁽⁴⁾

(5) 超音波探傷器等

超音波探傷器は、日本クラウトクレーマ社製の USIP-11, 超音波探触子は振動子寸法 $20\text{ mm } \phi$ で周波数 2 MHz のものを使用した。

遅延回路は、ナノパルスライトを任意の時刻に閃光させるためのトリガパルスを発生するものである。超音波探傷器の同期信号を基準に、遅延回路によって連続して可変することのできるナノパルスライト用のトリガパルスを作り、ナノパルスライトの本体側に入力して、超音波パルスが発生した後の任意の時刻にナノパルスライトを閃光させるようにした。

(6) 装置の特徴

偏光シュリーレン法装置は、付録 3 に示す 2 面对向方のシュリーレン法装置を応用したものである。

偏光シュリーレン法装置の特徴は、受光部の偏光板製ナイフエッジ(図 3.3), ナイフエッジ(付図 1.6), 偏光板(付図 2.3(b))の各々の交換だけで偏光シュリーレン法装置、シュリーレン法装置、光弾性実験法装置の 3 種類の装置として使用できる。

3.2 超音波パルスの可視化試験方法

開発した偏光シュリーレン法装置の機能性能を確認するために次の方法で水中と固体モデル中の超音波パルスの可視化試験を実施した。

偏光シュリーレン法装置を図 3.4 に示すように配置した。水槽中に図 3.5 に示すパイレックスガラスで作った試験片を入れて、水を試験片の上端から上方 30 mm まで満たして探触子を試験片の上方 20 mm に配置した。

この配置状態でまず①偏光シュリーレン法装置による超音波パルスの可視化試験では、試験片中に超音波パルスを斜に入射する水浸斜角探傷法と、試験片中に超音波パルスを垂直に入射する水深垂直探傷法によって、図 3.5(a)に示す無欠陥の試験片と図 3.5(b)に示す 3 mm ϕ のドリル穴付試験片（水浸斜角探傷のみ）を対象に超音波パルスの可視化試験を行った、次に②一般のシュリーレン法装置に組み変えて（付図 1.7 に示す通り偏光板製ナイフエッジを従来のナイフエッジに取り換える）超音波の可視化試験を行った、③光源部と受光部に偏光板を置いて（受光部は付図 2.4 に示す通り縦来のナイフエッジを除き、その近傍に偏光板を置く）光弾性実験法装置に変更して、超音波パルスの可視化試験を行った。

超音波パルスの可視化に際しては、超音波探傷器の同期信号を基に、遅延回路で同期信号に一定の遅延時間を与えてナノパルスライトに送り、遅延時間を変えながら各々の時刻における水中および試験片中を伝播中の超音波パルスを静止画像としてカメラで取らえ、ASA 400 の白黒フィルムに撮影した。露出時間は 8 秒である。

4. 試験結果と考察

(1) 偏光シュリーレン法

本研究で開発した偏光シュリーレン法装置による超音波パルスの可視化試験結果を図 4.1 に示す。

図 4.1 の(イ)は超音波パルスが水中を伝播中の可視化像，(ロ)は試験片中に超音波パルスが入射中の可視化像，(ハ)は試験片中を伝播して行く超音波パルスと試験片の上面で反射して，再び水中を伝播していく反射超音波パルス，(ニ)は超音波パルスがドリル穴に反射して，球面波が発生した可視化像である。

このように，偏光シュリーレン法装置では，水中と試験片中の超音波パルスを同時に可視化することができた。

なお，この可視化像から，水中と試験片中の超音波パルスの音圧分布，進行方向，屈折角，周波数，横波，縦波等が定量的に測定できる見通しを得た。

付録 7 の付図 7.1 (a)(b)(c)と付図 7.2 (a)(b)(c)(d)は一般の探傷試験でよく使用される水浸斜角探傷法を模擬し，遅延回路によってナノパルスライトの発生時間を変えながら超音波パルスの伝播の様子を可視化したものである。特に付図 7.1 (a)の(ハ)(ニ)のように，超音波パルスが水中から試験片中に入射する様子や入射の際の屈折角等が明瞭に可視化できた。さらに，試験片中のコーナで反射屈折を繰返す様子や，水中における試験片と水面間での超音波パルスの反射の様子が可視化できた。

付図 7.2 に示すドリル穴付試験片を対象とした水浸斜角探傷試験では，(リ)～(ヨ)のように超音波パルスがドリル穴に当たって球面波が発生し，球面波が刻々と広がって行く様子が明瞭に可視化できた。実際の探傷試験ではこの球面波を検出して欠陥の位置と欠陥の性状等を推定するものであり，超音波探傷法による欠陥寸法の定量化試験のための重要な超音波パルスが十分可視化できた。

さらに，欠陥を通過した超音波パルスは，欠陥を通過した部分だけ弱くなっている様子など，可視化試験でしか得られない貴重な情報を得ることができた。

付図 7.3 (a)(b)は水浸垂直探傷法により，水中と試験片中の超音波パルスを可視化した図である。

(2) シュリーレン法

シュリーレン法装置で超音波パルスを可視化した結果を付録 7 の付図 7.4 に示す。

付図 7.4 の(イ)は超音波パルスが探触子から発振して水中を伝播中の超音波パルス，(ロ)は超音波パルスが水中から試験片中へ入射する瞬間の超音波パルス，(ハ)(ニ)は試験片の上面

で反射して、再び探触子の方向に向かって伝播中の反射超音波パルスである。

ここで、(ロ)で試験片に入射した超音波パルスは、(ロ)以後は本来試験片中にも伝播中であるが（試験片中の音速は水中の音速の約2倍のために、たとえば、(ニ)の場合試験片中のパルスは、試験片上面から水中を伝播中の超音波パルスまでの距離の約2倍に相当する位置を伝播していることになる）、シュリーレン法装置では試験片中の超音波パルスを可視化することはできなかった。

試験片中の超音波パルスが可視化できない理由は、試験片中では超音波パルスの感度が低く、屈折角の変化が非常に小さいためである。

(3) 光弾性実験法

光弾性実験法装置で超音波パルスを可視化した結果を付録7の付図7.5に示す。

付図7.5の(イ)は探触子から発振して水中を伝播中の可視化像（水中での超音波パルスは可視化できていないが）、(ロ)は超音波パルスが水中から試験片中に入射して試験片中を伝播中の可視化像である。(ロ)の場合は試験片の上面で反射して再び水中を伝播中の反射超音波パルスも生じているはずであるが、光弾性実験法装置では、水中の超音波パルスは可視化できなかった。

光弾性実験法によって水中の超音波パルスが可視化できない理由は、水は超音波パルスによって剪断応力がかからないためである。ただし、付図7.5でもわかるように、水中でも少し陰のような超音波パルス像が観察できている。これは、超音波パルスが水中で水との密度勾配を作り、光の屈折作用によって生じた超音波パルスの陰と考えられる。

(4) 超音波パルスを定量的に評価することを目的とした上記試験の知見をとおして、偏光シュリーレン法装置に関し以下に示す改善を行うことにより、さらにその性能を向上することが期待できるといえる。

① 光源側は、20MHz程度までの超音波パルスの周波数が定量的に測定できるように、現状の閃光時間180 nsec（5 MHz程度までの周波数が測定できる）を閃光時間20 nsec程度に短くする必要がある。

② 閃光時間を短くすると、さらに光量が低下するので、光路中にある機器（水槽、レンズ等）での光量の減衰を極力少なくする工夫が必要である。

つまり、水槽の中やガラス窓を薄く、かつ、受光部のレンズの枚数を少なくする等して水、ガラス、レンズ中での光量減少を少なくして、受光部のスクリーンに到達する光量を現状の約100倍に向上する。

③ 受光側では、偏光板製ナイフエッジの光量調整用の偏光板を、観察状況に応じて可変（偏光光による像と同程度の光量にする）できるようにする工夫が必要である。

(5) 超音波パルスを定量的に測定するためには、その性質上多量の信号を同時に処理するこ

とが要求される。これに効率よく対応するためには、超音波パルスの可視化像をビデオ信号に変換して、ビデオ信号を画像処理することによって行う必要がある。このために、高感度の ITV カメラによる超音波パルスの可視化像の集録と、画像処理システムの設計および試作試験を進めて行くべきである。

5. 結 言

水浸型超音波探触子を含めた種々のタイプの探触子から出力される超音波パルスの音場と超音波パルスの波形などの総合的な性能評価および検定などを行うために、シュリーレン法と光弾性実験法の両方の特徴を同時に適用できる偏光シュリーレン法を考案し、偏光シュリーレン法装置を開発した。

本研究の結果を要約すると次のようになる。

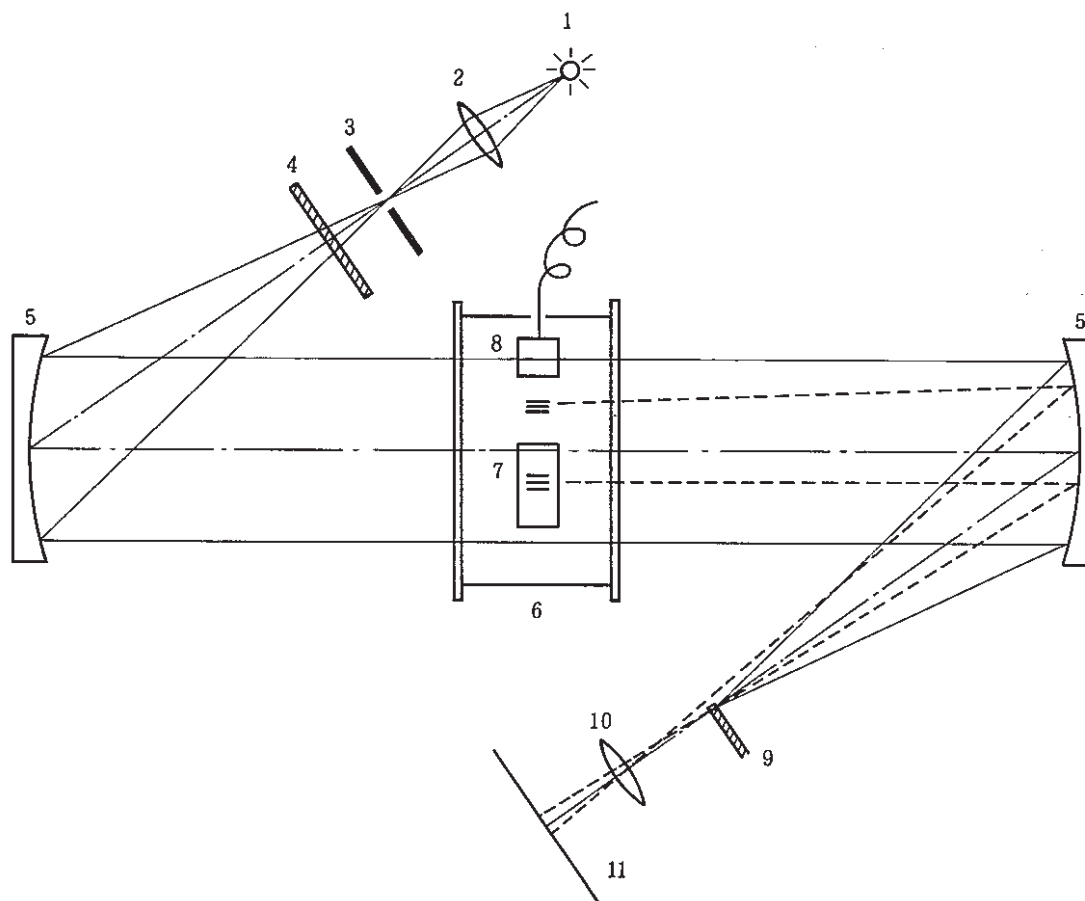
- (1) 開発した偏光シュリーレン法装置は、2面対向法のシュリーレン法装置を応用したものである。偏光板製ナイフエッジ、ナイフエッジ、偏光板の各々を適用することにより、偏光シュリーレン法装置、シュリーレン法装置、光弾性実験法装置の3種類の装置として使用でき、超音波パルスの可視化試験の目的に合わせて使いわけることができる。
- (2) 開発した偏光シュリーレン法装置の機能性能確認試験では、偏光シュリーレン法の原理に基づく通り、水中と固体モデル中の超音波パルスを同時に可視化することができた。
偏光シュリーレン法装置による超音波パルスの可視化試験によって、超音波パルスの音圧分布、進行方向、屈折角、周波数、横波、縦波等が定量的に測定できる見通しを得た。
- (3) 偏光シュリーレン法装置によって超音波パルスを定量的に測定するために、装置の機能性能の向上案を提示した。
- (4) 偏光シュリーレン法装置による超音波パルスの可視化は、超音波探傷技術者の教育と訓練、一般産業界等における技術（検査手法、超音波探触子の開発等）の進歩、重要な機器構造物等の品質管理の向上あるいは健全性確認の際の性能向上等に有用な手段を提供するものと考ええる。

6. 参考文献

- (1) 金子 淳, 尾嶋弘行, 谷本健一 他 1 名: 「ふげん」の ISI 装置の開発と使用実績, 動燃技報, No.58, 1986. 6.
- (2) 日本電気協会: 軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査, JEAC 4205 - 1980, 昭和55年 2 月 5 日.
- (3) 通商産業省: 発電用原子力設備に関する構造等の技術基準 (昭和55年度通商産業省告示 第 501 号), 昭和55年.
- (4) 伊達, 伊東, 島田: 光弾性を用いた固体内弾性波の観察, 日本非破壊検査協会, 第33巻 第 7 号, 昭和58年 7 月.
- (5) 浅招 強: 流れの可視化ハンドブック, 朝倉書店.
- (6) シュリーレン法装置カタログ, 溝尻光学工業所, 昭和60年.
- (7) 倉元真実: 光弾性の原理と解析法.
- (8) 光弾性実験装置カタログ, 溝尻光学工業所, 昭和60年.
- (9) シュリーレン法装置取扱説明書, 溝尻光学工業所, 昭和51年.
- (10) ナノパルスライト取扱説明書, 菅原研究所, 昭和60年.
- (11) Polarizing filters, Spectral photometric data, ポラロイド社, 昭和60年.

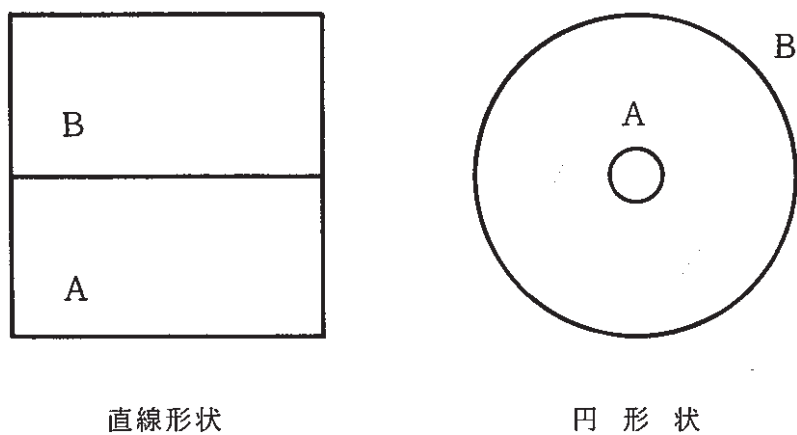
表 3.1 各種ガラス材料の音速と光弾性定数

	鋼	パイレックス ガラス	石英ガラス	板ガラス	鉛ガラス
縦波 m/sec	5,900	5,490	5,980	6,000	6,005
横波 m/sec	3,230	3,420	3,710	3,520	3,490
光弾性定数 Brewster	—	3.90	3.47	2.60	3.00



1. ナノバルスライト
2. 集光レンズ
3. ピンホール
4. 偏光板
5. 凹面鏡
6. 観測部(水槽)
7. ガラス試験片
8. 超音波探触子
9. 偏光板裂ナイフエッジ
10. カメラレンズ
11. スクリーン

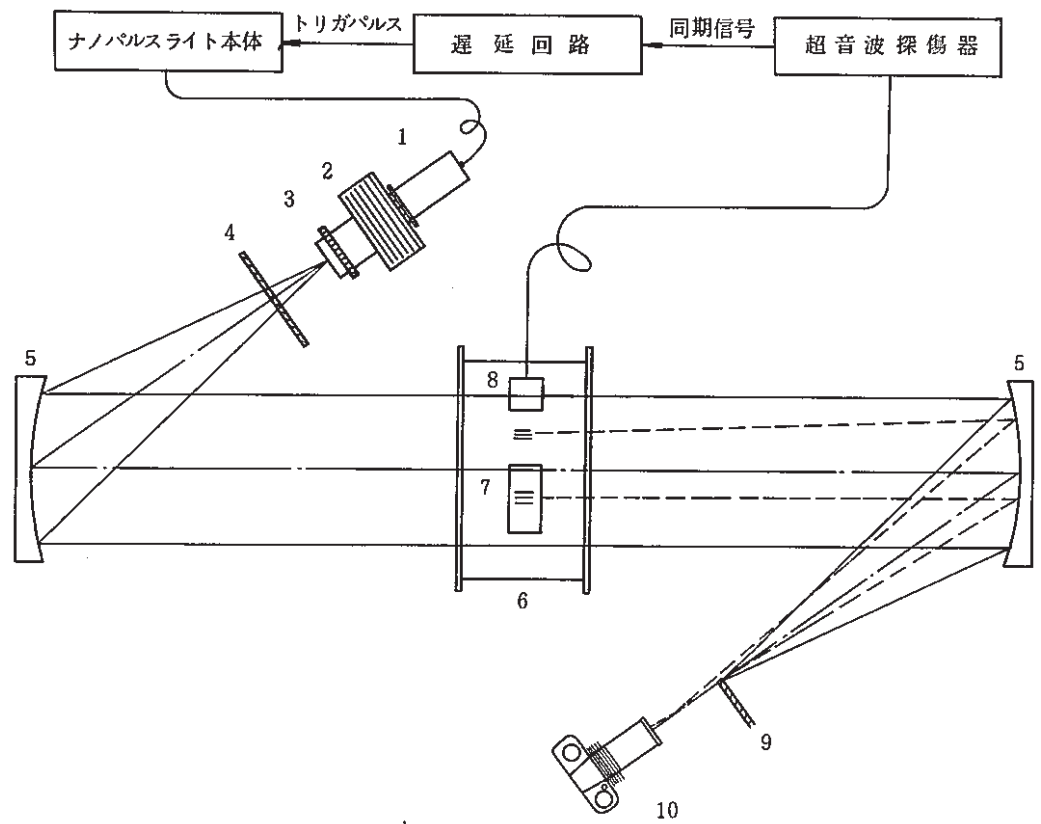
図 2.1 偏光シュリーレン法装置の構成



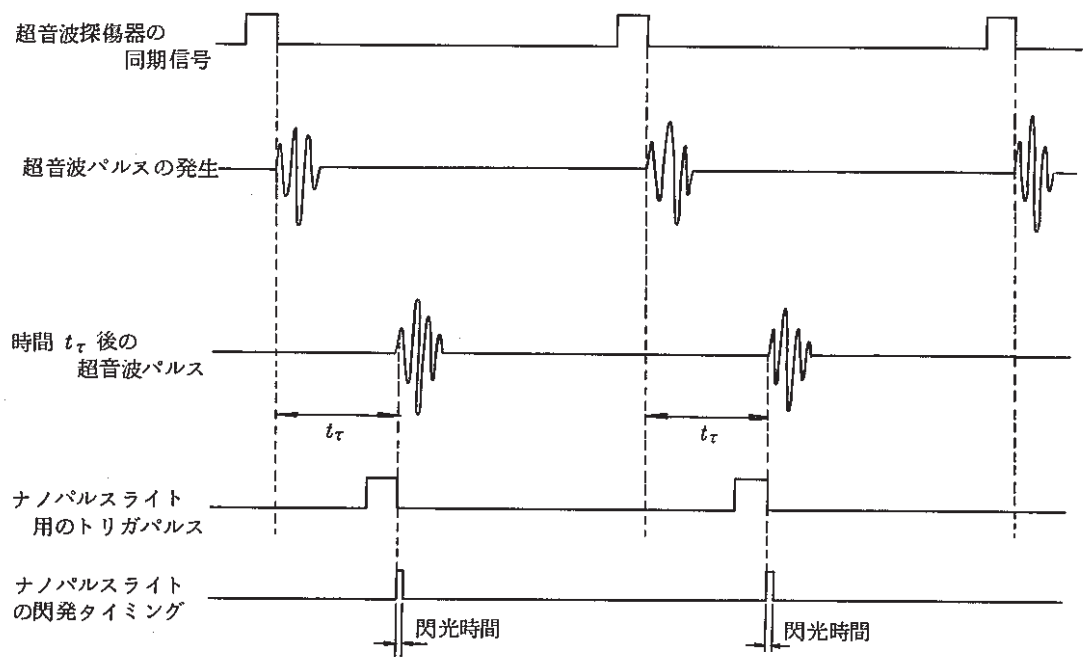
A：ナイフエッジの役目をする偏光板

B：光量減少用の偏光板

図 2.2 偏光板製ナイフエッジの形状



(a) ブロック図



(b) タイムチャート

図 2.3 超音波パルスの静止画像観察方法

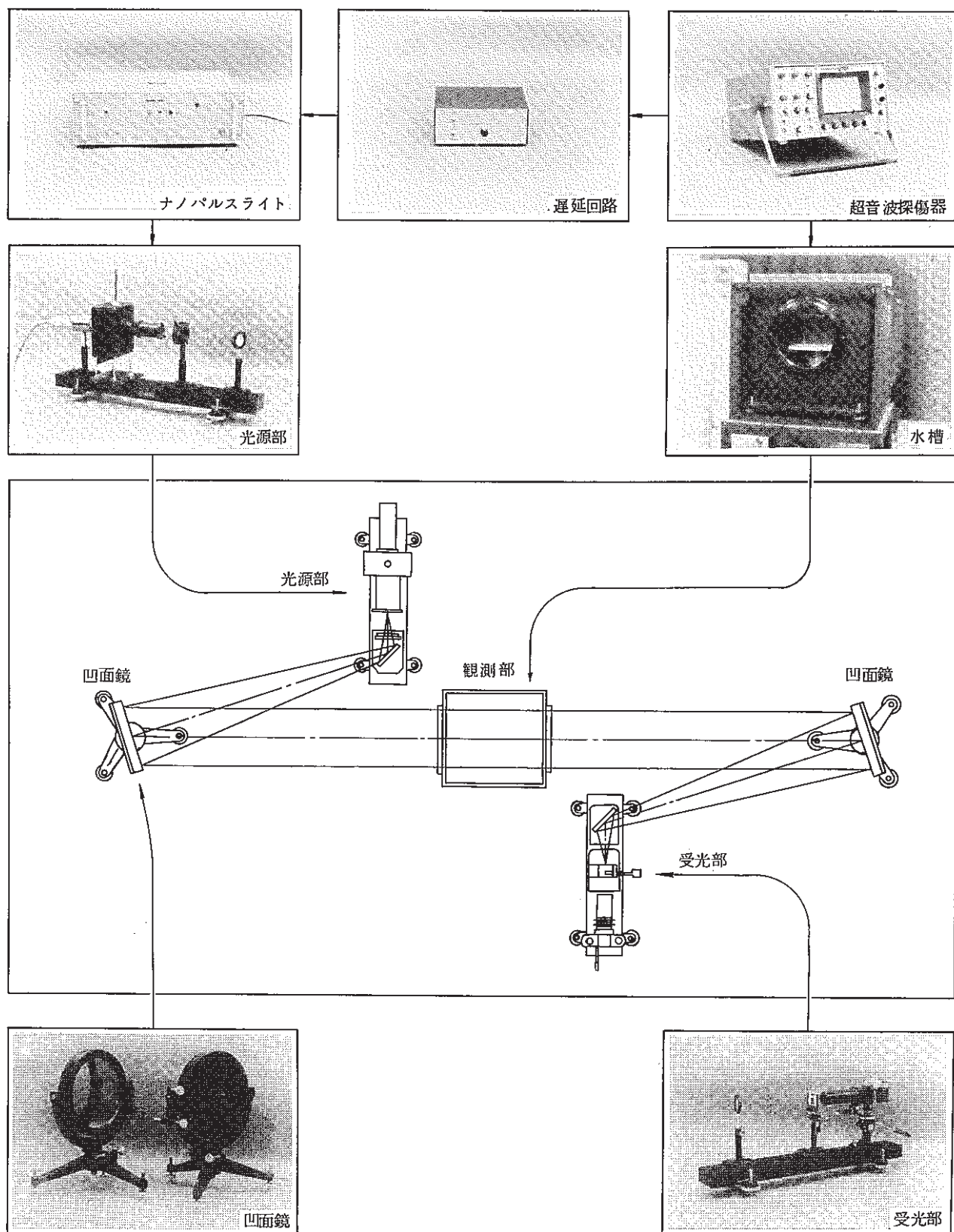


図 3.1 偏光シュリーレン法装置

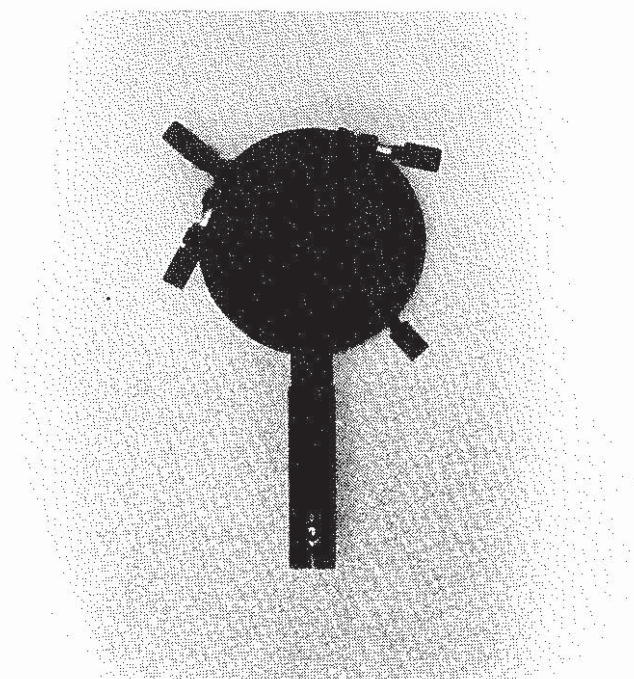


図 3.2 偏 光 板

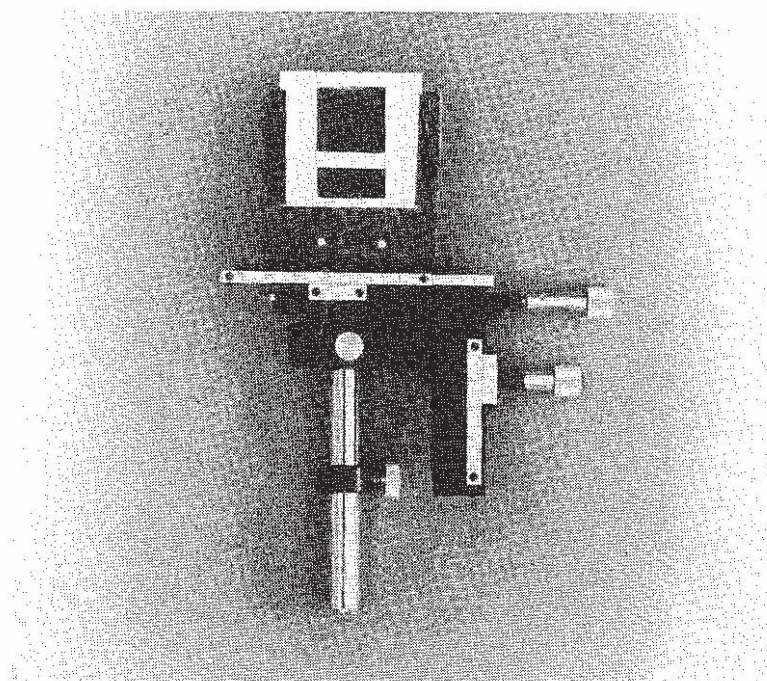


図 3.3 偏光板製ナイフエッジ

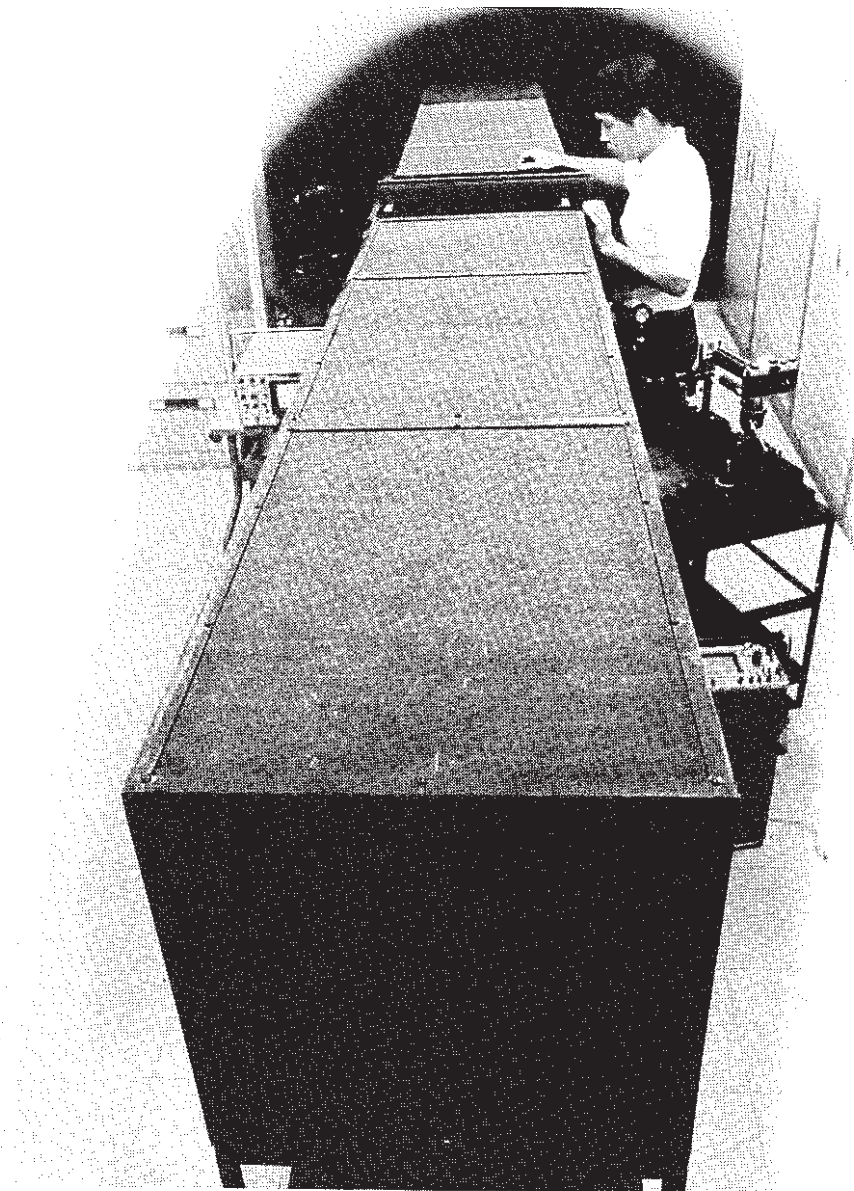
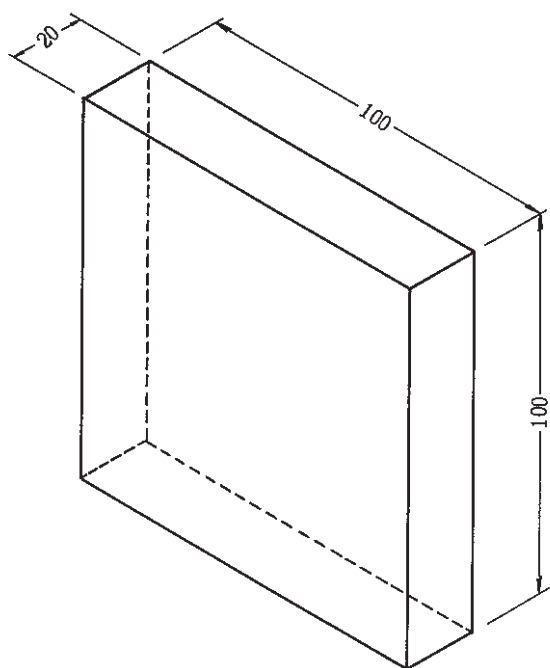
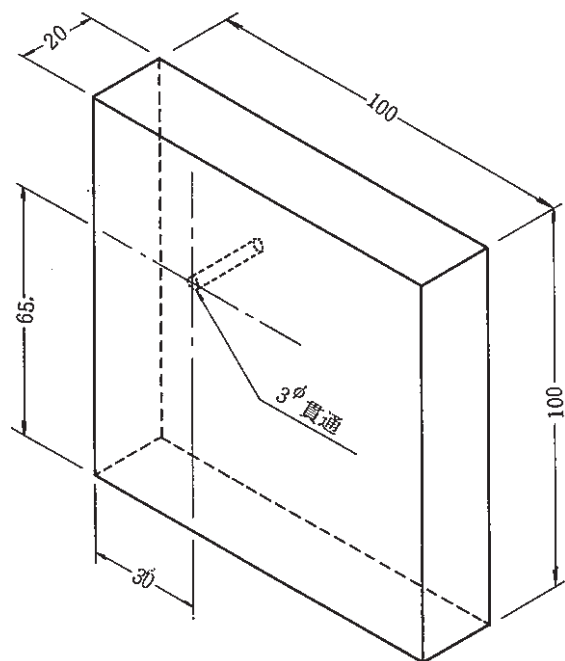


図 3.4 偏光シュリーレン法装置の配置



(a) パイレックスガラス試験片



(b) パイレックスガラス試験片 (3 mm φドリル穴付)

図 3.5 試験片

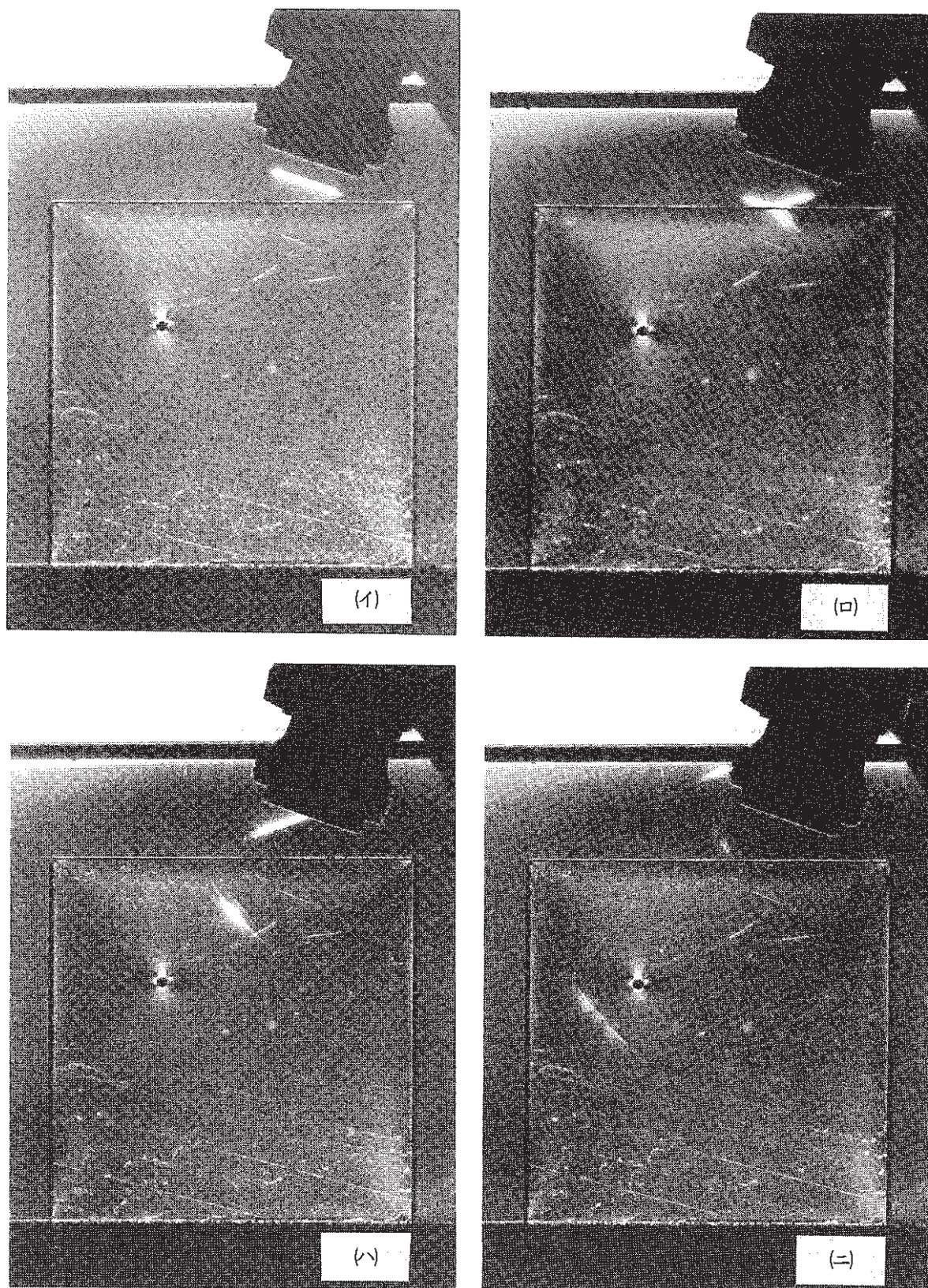


図 4.1 偏光シュリーレン法装置による超音波パルスの可視化像

付録1. シュリーレン法の原理

1. シュリーレン法の原理⁽⁴⁾

ドイツ語の“ Schliere ”とは、空気やガラスの中にできる光学的なむらという意味である。レンズや鏡のむらを調べるためにナイフエッジを用いた光学的な手法を考え出したのは Foucault (1895) である。Toepler (1864) はその原理を流れなどの可視化に応用した。これが以下に説明するシュリーレン法の基本的な原理である。

シュリーレン法の基本的な構成を付図 1.1 に示す。光源 S は第 1 主レンズ L_1 の焦点におく。第 1 主レンズ L_1 と第 2 主レンズ L_2 の間にある観測部 T では、平行光線が通過する。第 2 主レンズ L_2 の焦点 K に、光源 S の像がむすばれる。さらに、カメラレンズ G は観測部 T のなかにある点 Q の像をスクリーン上の点 P にむすぶ。もし、観測部において密度（または屈折率）が x 方向あるいは y 方向に変化しなければ、実線で示すように Q を通る光線も Q' を通る光線も焦点 K 上で完全に一致して、光源のくっきりとした像をむすぶ。ところが、観測部の中で、 Q のところだけが他の点（ Q' など）と密度勾配が異なると、 Q を通過する光線は点線のように屈折し、 Q' などを通る光線がむすぶ像とは幾分ずれて像をむすぶことになる。そのずれ量はほぼ $F_2 \epsilon_y$ となる。ここで、 F_2 は第 2 主レンズの焦点距離で ϵ_y は Q を通る光線が観測部で y 方向に屈折する角度である。

S に四角形の光源を用い、ナイフエッジを K にセットする。観測部に光学的な乱れ（局所的な密度勾配）がないときに、光の一部をさえぎるように光源の像の中間にナイフエッジを調整すると、スクリーン上の明るさは全面一様にいくぶん暗くなる。ここで、もし Q に光学的な乱れが生じて、そこを通る光線が点線で示すように屈折すると、スクリーン上の Q の像 P の明るさは、付図 1.2 に示すようにナイフエッジの上を通過してくる光量が増す分だけ他の点（ P' など）より明るくなる。 Q における屈折が付図 1.2 と逆の向きになれば P の明るさは暗くなる。このようなときの P の光度 I の変化量 ΔI は次式で与えられる。

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{F_2 \epsilon_y}{a} \quad (1.1)$$

ここで、 a は光源の像の高さである。

シュリーレン法の感度を上げるには (1.1) 式から主レンズの焦点距離 F_2 を大きくし、光源の像を小さくし、屈折角を大きくするために観測部の幅 d を大きくすればよいことがわかる。さらに、付図 1.3(a) からわかるように、 $x-y$ 面内の二次的な流れに対してはナイフエッジに平行な方向の光源の像の動きは光度に影響がなく、直角な方向の動きのみが (1.1) 式で示す光度の変化を与える。したがって、測定したい現象の圧力勾配が最も急になる方向と直角の向きにナイフエッジをセットすると感度が最も高くなる。いずれの方向の密度勾配に対しても一様な感度を得るためには、付図 1.3(b) に示すような円光源と円い孔のあいたナイフエッジの組合せを用いればよい。光学的乱れのないときに、光源の円い像をナイフエッジの

円い孔にちょうど一致させておけば、光源の像がいずれの方向に動いても光度は減少する。スクリーン上の明るさが、直線刃のナイフエッジを用いる時に比べて明るくなる利点もある。

光学装置の精度をいくら上げて、光の回折現象のために光源の像の大きさがある値以下にすることはできない。その最小値 $a_{\min}$ は

$$a_{\min} = \frac{\lambda F_2}{2s} \quad (1.2)$$

で与えられる。ここに λ は光の波長、 s は光源スリットの高さである。

シュリーレン法の原理を用いた測定は、付図 1.1 に示した基本的な方法以外にも、研究の目的と状況に応じて種々の工夫がなされている。

付図 1.4 は凹面鏡を用いた例で、現在最も一般的に行われている方法である。風洞実験の場合、流れを調べたい観測部の範囲はできるだけ大きくしたいのが通例である。ところが、口径と焦点距離が充分大きく、光学的精度の良いレンズを製作することは非常にむずかしい。それに対し、凹面鏡は色収差がなく、光の吸収も少なく、大口径長焦点のものを比較的容易に製作できる。ここで用いられる 2 組の凹面鏡 C_1 と C_2 は放物面鏡であるが、あまり口径が大きくないときには球面鏡を使うこともできる。角度 θ_1 と θ_2 は収差を防ぐ意味からできるだけ小さいほうが好ましく、7 度以下にすることが推奨されている。また C_1 と C_2 の距離はその焦点距離の 2 倍以上にすべきである。実験室の広さなどの関係で充分な距離をとれない場合には、平面鏡を適当に用いて光学的距離をかせぐことも考えられる。T と C_2 の距離は必ず C_2 の焦点距離より長くしなければならない。収差を防ぐ意味では、 C_1 と C_2 は同一平面で、かつ、中心線をはさんだ対称位置にセットしたほうがよい。

付図 1.5(a) は観測部の片側に平面鏡 E をおいて、観測部に光を 2 度通過させて凹面鏡を 1 枚で兼用する方法である。風洞や回転翼列などの実験で、観測部の両側にガラスを取りつけることのできない場合によく応用される。

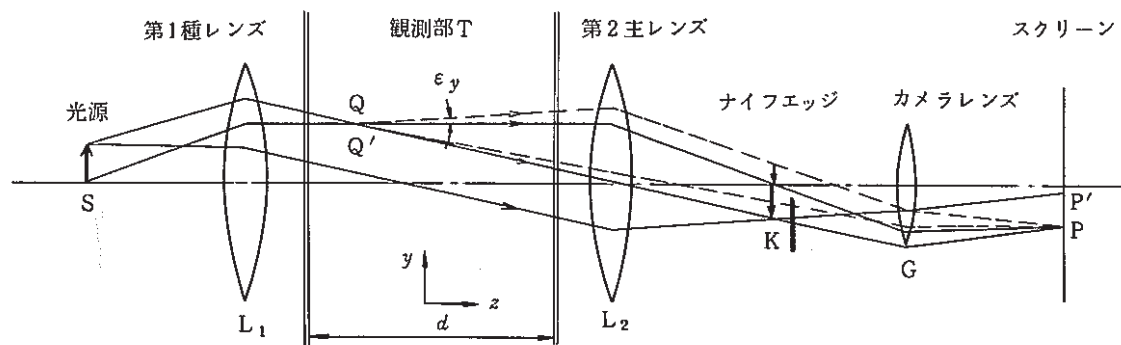
付図 1.5(b) も観測部を往復 2 回光線が通過する方法であり、凹面鏡を観測部をはさんで光源の反対側にセットする。この方法の感度はよく、

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{4\epsilon F}{a} \quad (1.3)$$

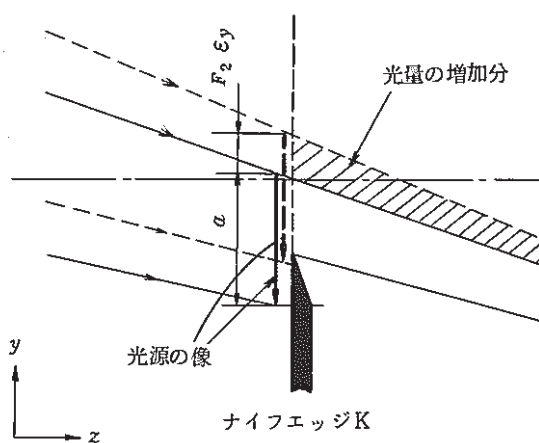
で与えられる。したがって、密度変化の小さい現象や密度レベルの低い実験（低密度風洞）に利用される。

付図 1.6 は、シュリーレン法装置に使用するナイフエッジ、付図 1.7 は 3 節の 3.2 項で述べたシュリーレン法装置の構成図である。

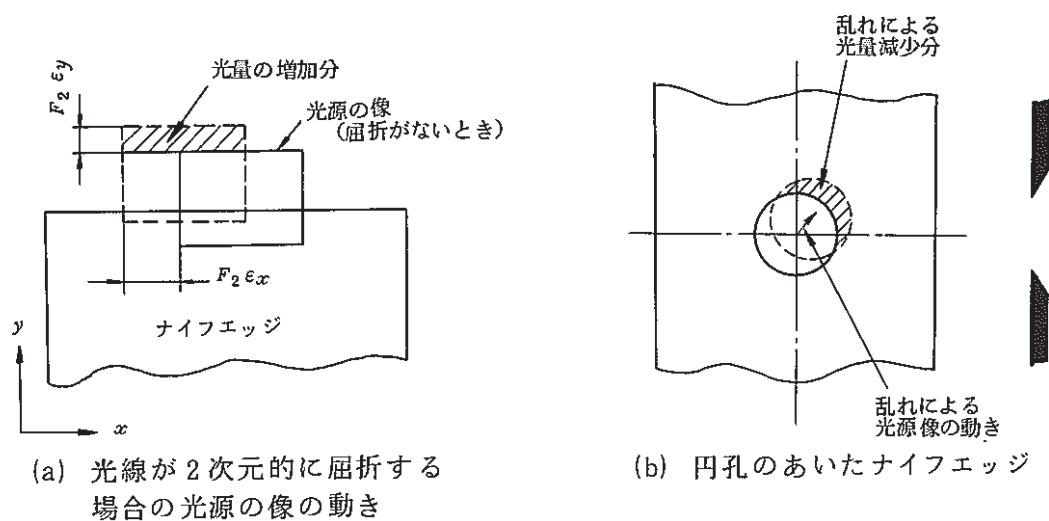
付図 4.2 は上述した「シュリーレン法」の原理と基本光路をまとめたものである。⁽⁵⁾



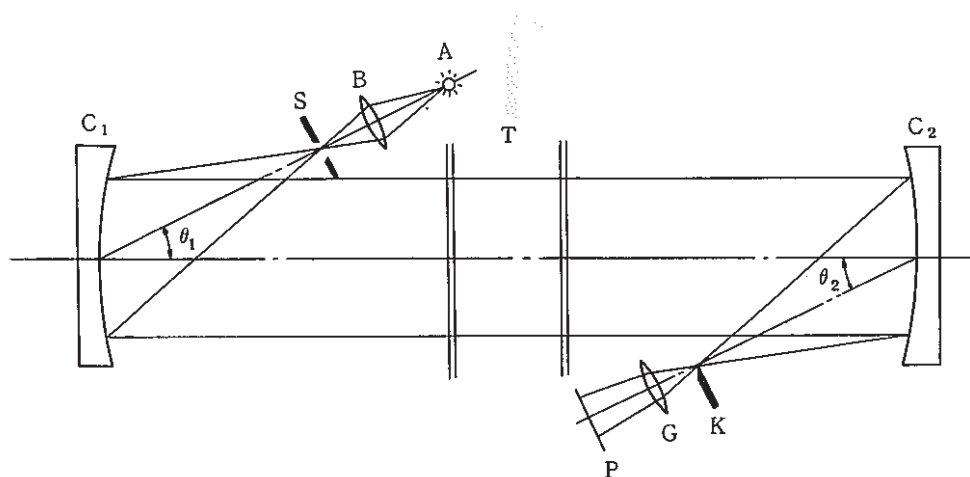
付図 1.1 シュリーレン法の基本的構成



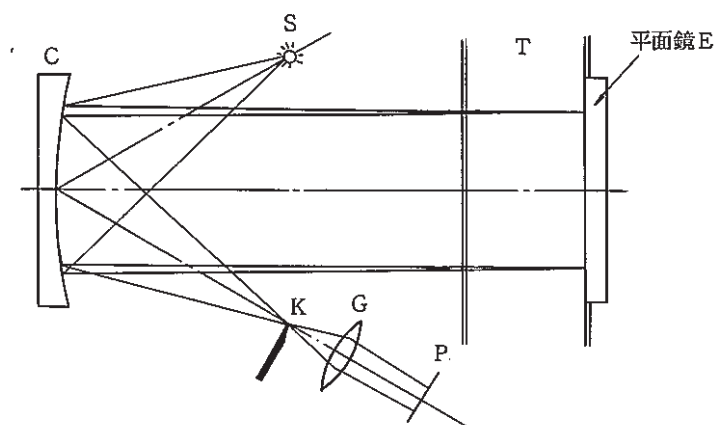
付図 1.2 ナイフエッジ部詳細



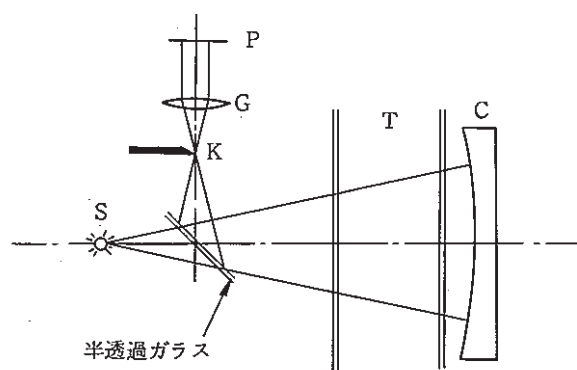
付図 1.3 ナイフエッジと光量



付図 1.4 2個の凹面鏡を用いた一般的なシュリーレン法

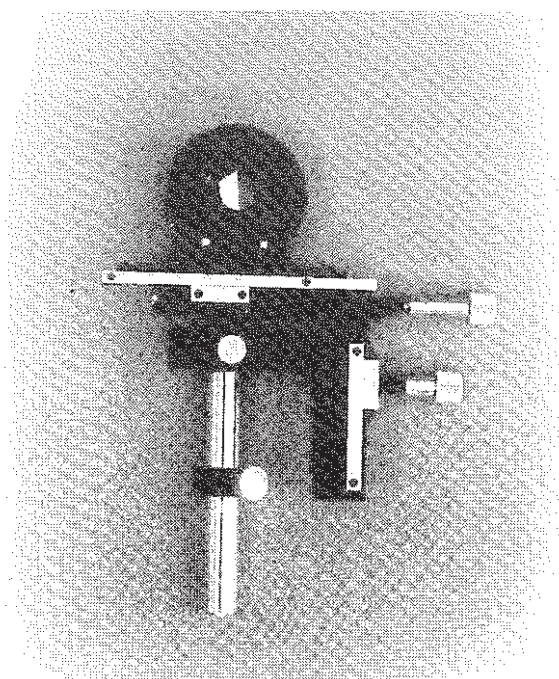


(a) 平面鏡を併用した場合

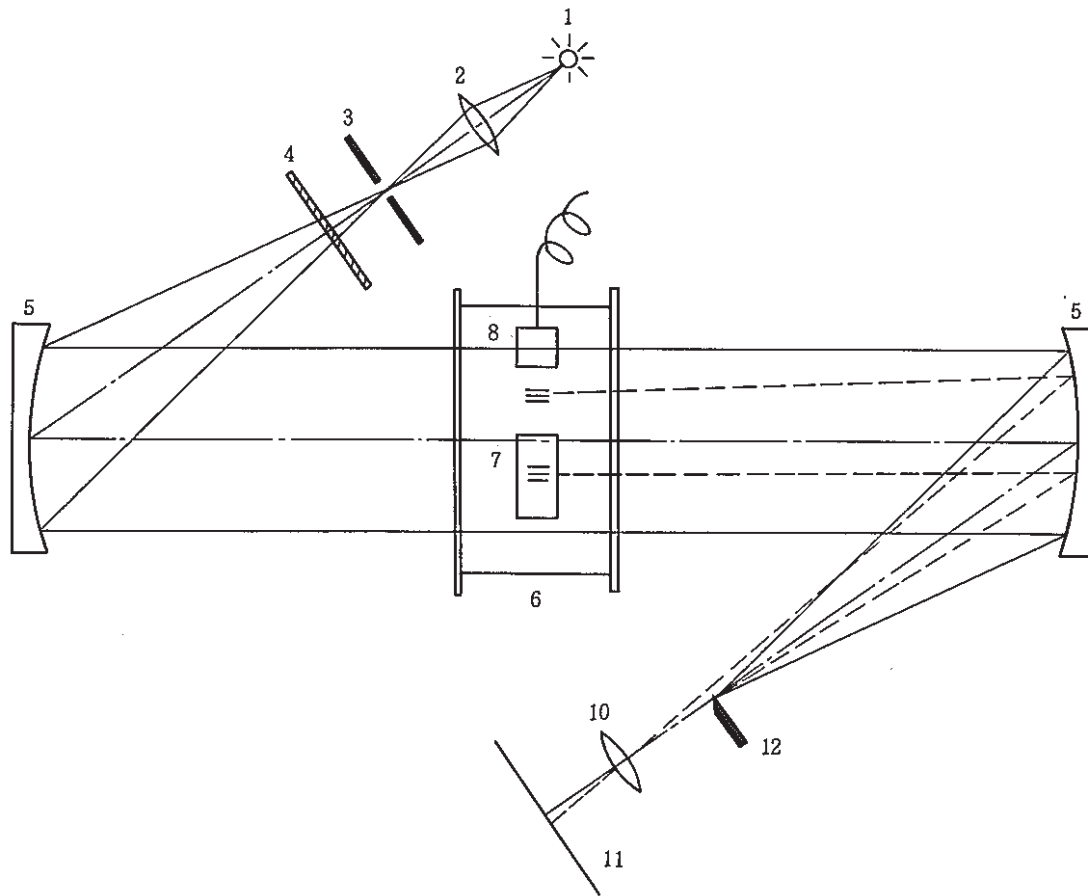


(b) 半透過ガラスを用いた場合

付図 1.5 凹面鏡を用いた反射式シュリーレン法



付図 1.6 ナイフエッジ



1. ナノパルスライト
2. 集光レンズ
3. ピンホール
4. 偏光板
5. 凹面鏡
6. 観測部（水槽）
7. ガラス試験片
8. 超音波探触子
9. 〔偏光板製ナイフエッジを除く〕
10. カメラレンズ
11. スクリーン
12. ナイフエッジ

付図 1.7 シュリーレン法装置の構成

付録2. 光弾性実験法の原理

2. 光弾性実験法の原理⁽⁶⁾

光弾性実験法は D. Brewster (1815) によって発見された人工複屈折現象を基本原理にしている。19世紀にはいつてからは E.G.Coker をはじめとした多くの工学者と高分子材料の進歩と相伴って、飛躍的な発展を遂げた。応力凍結法の確立は二次元問題から三次元問題への拡張を可能にして、現在ではひずみゲージ測定法や X 線応力測定法などと共に、実験的応力解析法の有力な手段の一つになっている。

透明な平板を加工して作った二次元光弾性モデルに、内面負荷を与えて平面応力状態として、これに偏光を垂直に入射すると等方等質の透明体は負荷によって一時的結晶性を帯びて複屈折性を示す。付図 2.1 は上記平板内の任意の箇所における応力状態を σ_1 と σ_2 で表し、複屈折性を相対的光路程差 J で示したものである。すなわち、偏光が透明板の中にはいると主応力の方向に振動する平面偏光に分かれて進み、その両者の間には相対的な位相の差 J が生じる。無応力状態のモデルの屈折率を n_0 、負荷後における主応力 σ_1, σ_2 の方向に振動する平面偏光によって生ずる屈折率を、それぞれ n_1, n_2 とすれば、(2.1)式と(2.2)式の関係が成立する。

$$\begin{aligned} n_1 - n_0 &= C_1 \sigma_1 + C_2 \sigma_2 \\ n_2 - n_0 &= C_1 \sigma_2 + C_2 \sigma_1 \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$n_1 - n_2 = (C_1 - C_2)(\sigma_1 - \sigma_2) = C(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2.2)$$

ここで、 C_1, C_2 および $C (=C_1 - C_2)$ はモデル材料の特有の定数である。

屈折率は真空中（または空気中）での光の速度とその物質中での光の速度の比で与えられるから、その物質中を光が通過する距離、すなわち光路程（平板の厚さ）を t とすれば相対的光路程差 J は $t(n_1 - n_2)$ で与えられる。したがって、(2.2)式を用いて(2.3)式が得られる。

$$J = Ct(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2.3)$$

ここで、 J は長さの単位をもつ量である。

なお、一般に光弾性実験では光として単色光を使用することが多いので、 J の代わりに使用単色光の波長 λ で除した値 $N = J/\lambda$ を用いる。この N を縞次数といい次式となる。

$$N = \left(\frac{C}{\lambda}\right) t(\sigma_1 - \sigma_2) = \alpha t(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2.4)$$

ここで、 α は応力感度である。その単位は $\text{fr} \cdot \text{mm}/\text{kg}$ なる値の材料定数であり、さらに使用波長によっても変化する値である。(2.4)式は光弾性実験法の最も基本になる式であって、

N が測定できれば、主応力の差を求めることができる。

光弾性実験によって応力解析をするには、モデルのおおの位置における主応力の作用方向と主応力の差が必要である。平面偏光器は主として前者を求めるためのものであり後者には円偏光器が利用されている。

特定の方向（主軸と呼ぶ）に振動する光だけを通す2枚の膜、すなわち2枚の偏光板の間にモデルが入った配置を平面偏光器という。光の進行方向に対して最初の偏光板を偏光子（ P_1 ）、後のものを検光子（ P_2 ）と呼ぶ。そのうち特に重要とされているのは、 P_1 の主軸と P_2 の主軸を直交させたもので、これを直交平面偏光器と呼ぶ。付図2.2はこの配置による説明図である。 P_1 を通った平面偏光 $a \cos \omega t$ がモデルTに入ると、2主応力軸 σ_1, σ_2 の方向に振動する2つの平面偏光 $a \cos \phi \cos \omega t$ と $a \sin \phi \cos \omega t$ に分離される。そしてモデルTを出たときにはこの両者はこのモデルの光路程差によって、 $a \cos \phi \cos \omega t$ と $a \sin \phi \cos (\omega t + \delta)$ に変化して差異を生じる。ここで、 ϕ は P_1 の主軸と主応力 σ_1 の方向とのなす角であり δ は光路程差によって与えられる位相角であって、その値は $\delta = 2\pi J / \lambda = 2\pi N$ で与えられる。 P_2 はその主軸方向に振動する偏光しか通さないから、 P_2 を通過した光は上記の2つの平面偏光の主軸方向の成分の合成となり次式で表される。

$$\begin{aligned} & a \cos \phi \sin \phi \{ \cos \omega t - \cos (\omega t + \delta) \} \\ & = a \sin 2\phi \sin \frac{\delta}{2} \sin \left(\omega t + \frac{\delta}{2} \right) \end{aligned} \quad (2.5)$$

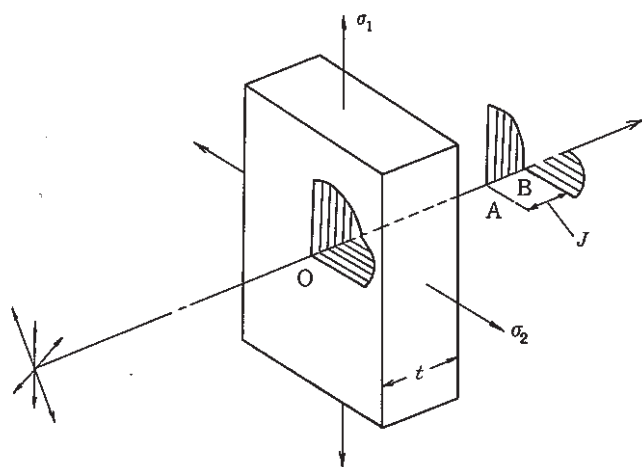
したがって、光の強さはその振幅の2乗で表現できるから、スクリーン上に写し出される光の強さ I は次式になる。

$$\begin{aligned} I & = a^2 \sin^2 2\phi \sin^2 \frac{\delta}{2} \\ & = a^2 \sin^2 2\phi \sin^2 \pi N \end{aligned} \quad (2.6)$$

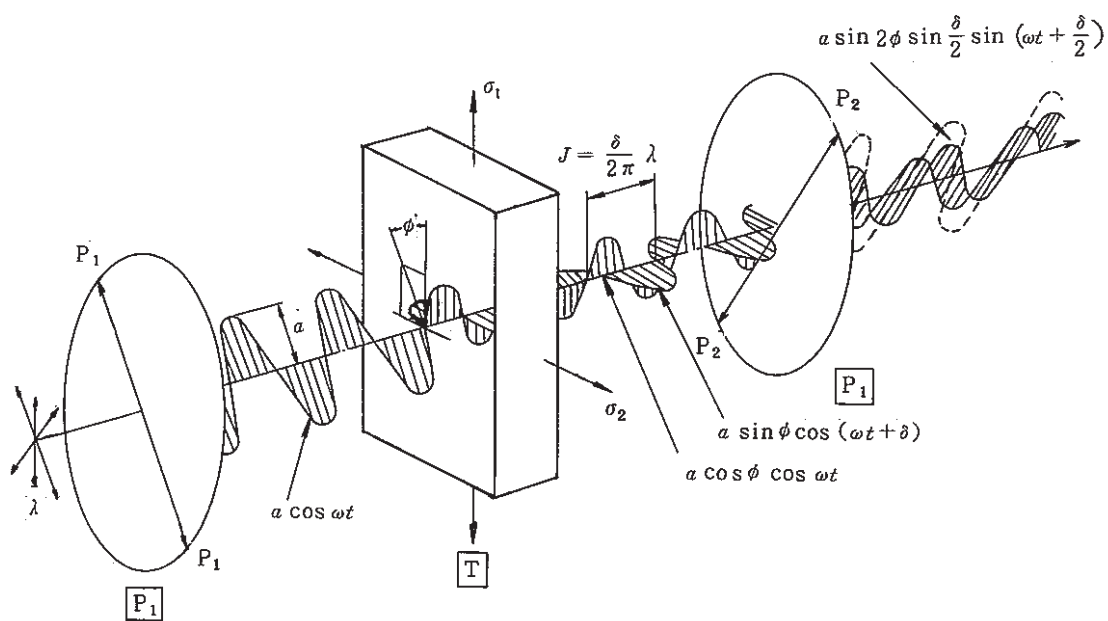
なお、(2.6)式からわかるように、主応力差が増加すると N が増加し、それに伴って光の強さ I は明暗の変化を交互に繰り返すことになる。これが干渉縞となって観察されることから、一般の光弾性応力解析法においては、この縞次数より N を求める方法がとられる。しかし、ここで対象としている固体内超音波は、干渉縞を生じるほど応力レベル（音圧）が小さくなく、音圧に比例して N が増加し、それに伴い I が増加する範囲内の現象である。

付図2.3は光弾性法実験装置に使用する光源部と受光部の偏光板、付図2.4は3節の3.2項で述べた光弾性実験法装置の構成図である。

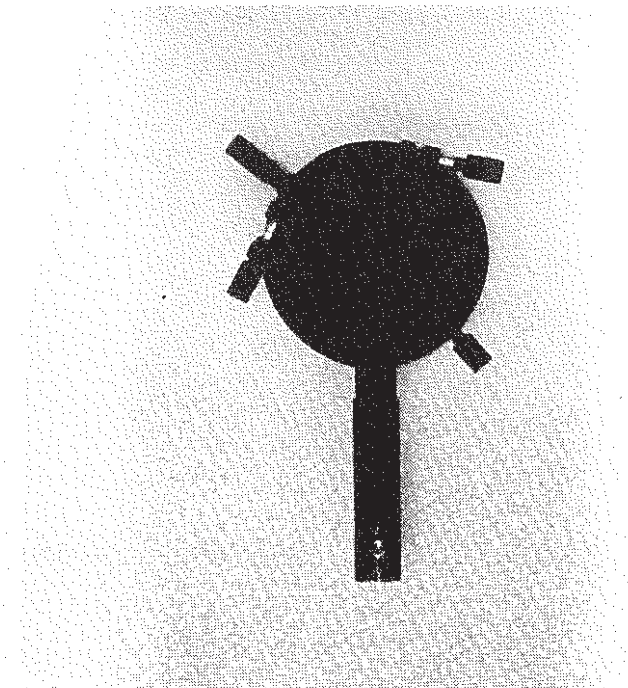
付図4.3は上述した「光弾性実験法」の原理と基本光路をまとめたものである。⁽⁷⁾



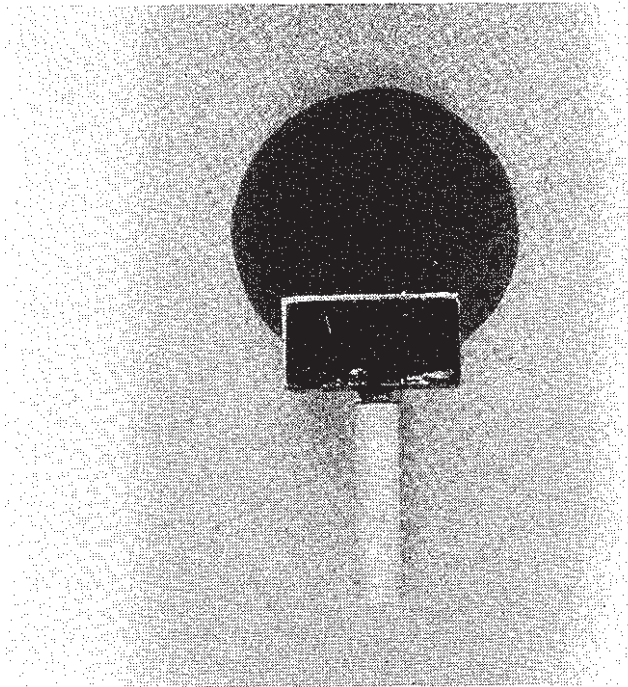
付図 2.1 主応力 σ_1 および σ_2 と相対的光路程差 J の関係



付図 2.2 直交平面偏光器の原理

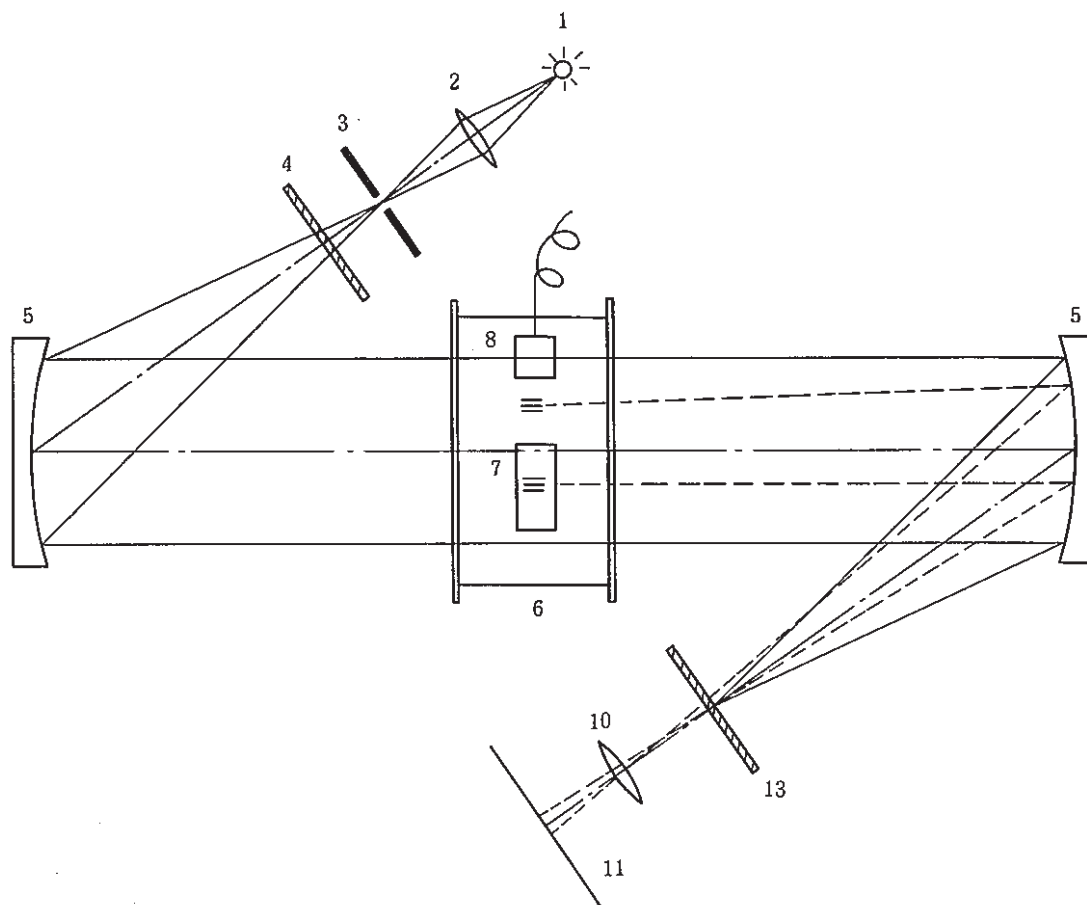


(a) 光源部偏光板



(b) 受光部偏光板

付図 2.3 偏 光 板



1. ナノバルスライト
2. 集光レンズ
3. ピンホール
4. 偏光板
5. 凹面鏡
6. 観測部(水槽)
7. ガラス試験片
8. 超音波探触子
9. 〔偏光板製ナイフエッジを除く〕
10. カメラレンズ
11. スクリーン
12. 〔ナイフエッジを除く〕
13. 偏光板

付図 2.4 光弾性実験法装置の構成

付録3. シュリーレン法装置

3. シュリーレン法装置

3.1 性 能

- (1) 観 察 範 囲 : 250 mm
- (2) 焦 点 距 離 : 2.5 m
- (3) 詳 細 仕 様 : 付表 3.1

3.2 構 成

- (1) 光源部：ナノパルスライト，コンデンサーレンズ，補助平面鏡No.1
- (2) 凹面鏡：シュリーレン凹面鏡No.1，No.2
- (3) 観測部：水槽，窓硝子No.1，No.2
- (4) 受光部：補助平面鏡No.2，ナイフエッジ，専用長焦点レンズ，カメラ

3.3 配 置 方 法

付図 3.4 は上面図である。配列に際しては，付図 3.4 の θ_1, θ_2 をできるだけ小さくすることが良い。これは非点収差を少なくするためである。光源側スリットは正しく f_1 におく。S が f_1 に正しくおかれているかどうかを判定するには，平面鏡を用いて付図 3.5 に示す通り光源を光源側に送り返す。その時スクリーン上の結像が光源スリットの形状を完全に再現していれば良い。これが正しく行われないう時は，像が不鮮明になったり光量の損失をみることになる。L, M_1 , M_2 , E, C は同一平面上に置かれるように留意する。

3.4 測定側における操作

スリット等により， M_2 の焦点の位置の大略を知る。その位置にカメラ側装置のナイフエッジを置く。光軸も大略合わせる。S, M_1 , M_2 , E, C の一連の平面に対して光源，スリット S，ナイフエッジ E，は垂直になるようにしておく。短形光源の場合は特に注意する。次に微動調整によって調整を行う。ナイフエッジの位置は完全に焦点に合わせる。付図 3.6 の m の位置を焦点とする。

ただし，ナイフエッジの位置が焦点よりもカメラ寄りにあった場合ナイフエッジによって光を切る過程において， P_0 のようにナイフエッジによって切る側から光は切られる。これはカメラレンズを通して来ているためであって，肉眼でみる場合は当然 o の位置で切った場合は，o の位置とは逆の方向から切られる。従って，o，i の間に焦点 m があるということになる。o，i を漸時追い込み，遂に焦点 m に至ることになる。この時はナイフエッジで完全に光が遮断される瞬間に鏡面全体は一斉に暗黒となる。これは完全には軸外点光源が理想的（拋物面鏡を用いた時であるが，本品は球面であるのでエラーが残る）で

あればあるほど感度は上がるが、實際上光源はある大きさを持つ、そのためナイフエッジによってできるだけ絞ることが必要である。

3.5 調整手順

- (1) 各部の光軸を合わせる。
- (2) あらかじめ2枚のシュリーレン凹面鏡の間隔を凹面鏡の焦点距離の約2倍にする。スケールで測定する程度でよい。また、凹面鏡2枚の中心に被測定対象物（以下試料）を置く。
- (3) 光源筐より射出した光を補助平面鏡のほぼ中心に入れる。この場合、付図3.7(a)に示すように極力凹面鏡2枚の中心を結ぶ光軸に対し直角に配置した方がよい。場所または台の都合上、付図3.7(b)の様にしてもよい。

付図3.7(b)の配置の場合は光が試料方向に進み、サンプルを照射し試料の側面が光り、撮影時に問題になる場合もある。また、平行光線の傍に光源筐等の発熱物があればそれが自然対流を起こし、写真にシュリーレンとして入る事もある。従って付図3.7(a)の方が良い。

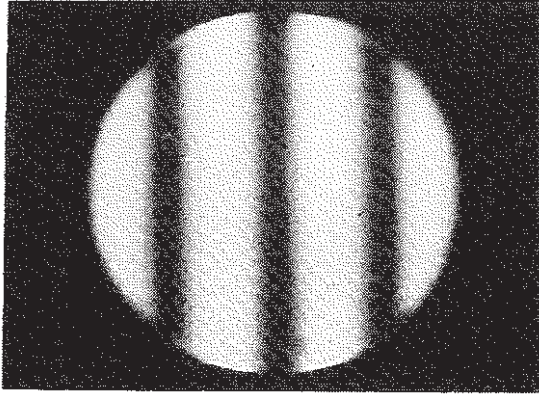
- (4) 次にピンホールを出た光が凹面鏡により、完全に平行光線になっているかどうかを知るために（凹面鏡の焦点の位置にピンホールが正しくあるか）凹面鏡を通過した後に平面反射鏡を置き（受光部の補助平面鏡を使う）、付図3.7(c)の様に光を反射させて光源筐のピンホール板に返す。その時の結像点が使用中のピンホール径と同じ径になる様ピンホール（光源筐）と凹面鏡の間隔を調節する。

平面反射鏡を置く位置は、凹面鏡より反射された後であればどこでも良い。ただし補助平面鏡の位置は、出来る限り平行光線寄りに置く。離れると球面収差のために、受光部のナイフエッジ上での結像が悪くなる。

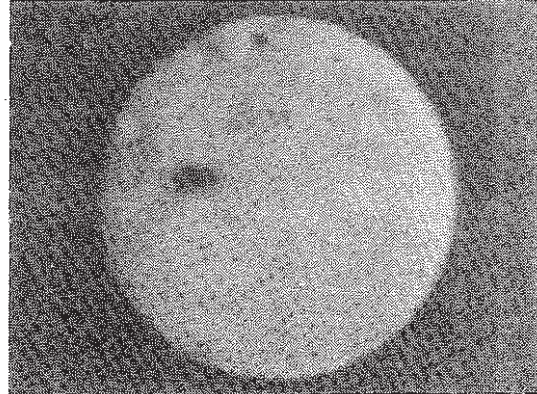
- (5) 平行光線になった事を確かめた後は、平行光線が切られない様に凹面鏡スタンドに付いている俯仰旋回ネジで受光側凹面鏡に入射させる。
- (6) 付図3.7(d)に示すように受光側凹面鏡で受けた光束を、光源からの光軸方向と逆方向に反射させルールに乗っている補助平面鏡で受ける。集束する光が20mmφ位になる所で補助平面鏡へ受け、ルール中心を光が通る様に平面鏡の角度、位置を決め集光点にナイフエッジを置く。
- (7) 専用長焦点レンズは受光側シュリーレン凹面鏡と試料までの距離を凹面鏡の焦点距離と等しくなるように距離を合わせる。長焦点レンズの位置は極力ナイフエッジに近づける。

付表 3.1 シュリーレン法装置の仕様

品 名 項 目	切換ミラー	コンデンサーレンズ (2個1組)	補 助 平 面 鏡		シュリーレン凹面鏡		窓 硝 子		リングナイフエッジ (3個1組)	専用長焦点 レ ン ズ
			No. 1	No. 2	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2		
材 質	厚板硝子	BK7	厚板硝子	厚板硝子	バイレックス	バイレックス	BK7	BK7	白 板	BK7 F2
歪	無	—	無	無	無	無	無	無	—	無
気 泡	—	—	—	—	—	—	無	無	—	無
実 径	35mm ϕ	40mm ϕ	40mm ϕ	40mm ϕ	280mm ϕ	280mm ϕ	273mm ϕ	273mm ϕ	25mm ϕ	33mm ϕ
有 効 径	30mm ϕ	35mm ϕ	40mm ϕ	40mm ϕ	250mm ϕ	250mm ϕ	250mm ϕ	250mm ϕ	スリット径： 0.510mm ϕ 0.805mm ϕ 0.130mm ϕ	30mm ϕ
厚 み	5mm	9mm	5mm	5mm	33mm	33mm	34mm	34mm	1.5mm	8mm
面 精 度	λ	—	$\lambda/4$	$\lambda/4$	$\lambda/20$ 以上	$\lambda/20$ 以上	$\lambda/4$	$\lambda/4$	—	—
平 行 度	—	—	—	—	—	—	2 分	2 分	—	—
焦 点 距 離	—	90mm	—	—	250mm	250mm	—	—	—	254mm
フーコーテスト	—	—	—	—	付図 3.1(a) 良	付図 3.2(a) 良	—	—	—	—
ロシキーテスト	—	—	—	—	付図 3.1(b) 良	付図 3.2(b) 良	—	—	—	—
表 面 処 理	Al 全反射 蒸着 シリコン保 護仕上げ	—	Al 全反射 蒸着 シリコン保 護仕上げ	Al 全反射 蒸着 シリコン保 護仕上げ	Al 全反射 蒸着 シリコン保 護仕上げ	Al 全反射 蒸着 シリコン保 護仕上げ	—	—	クロム蒸着	反 射 防 止 コーティング

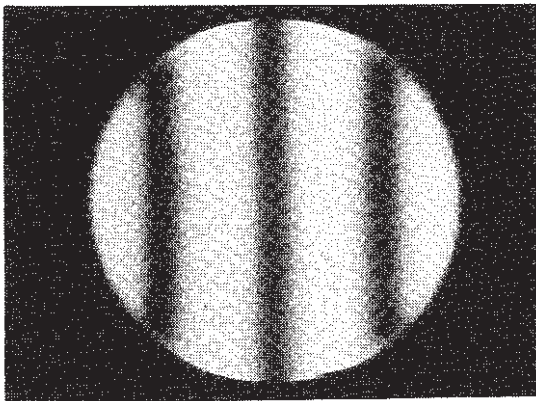


(a) フーコーテスト

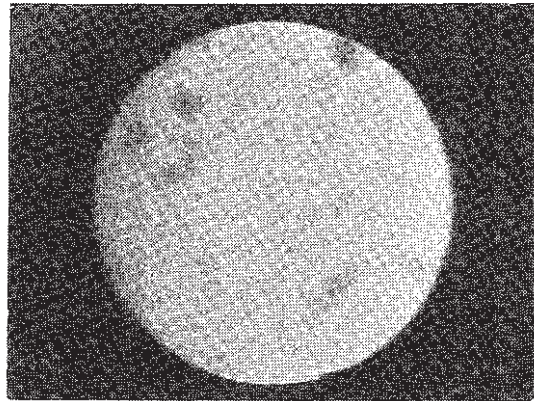


(b) ロンキーテスト

付図 3.1 シュリーレン凹面鏡 No.1

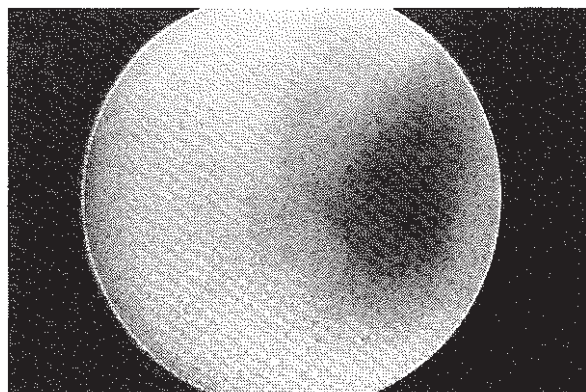


(a) フーコーテスト

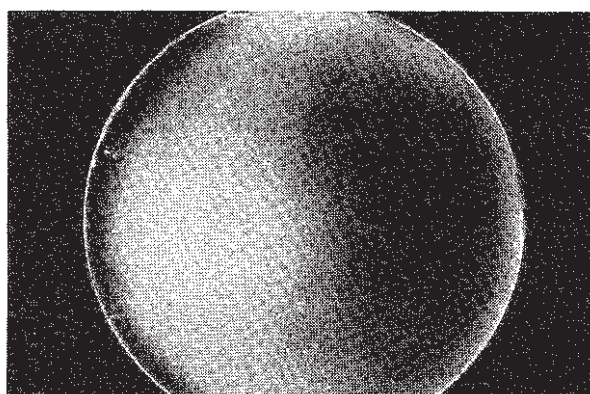


(b) ロンキーテスト

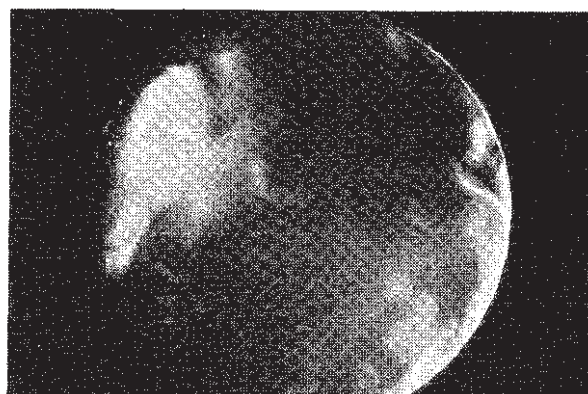
付図 3.2 シュリーレン凹面鏡 No.2



(a) シュリーレン法装置のみの場合（容器セルなし）

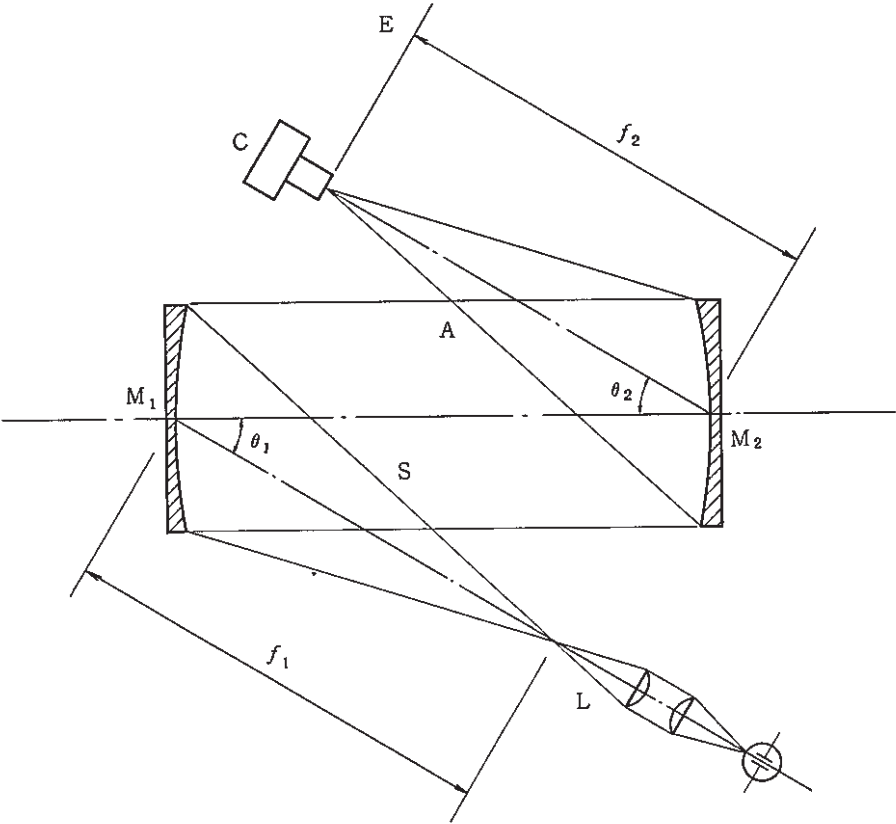


(b) シュリーレン法装置に測定部容器セルを挿入した場合

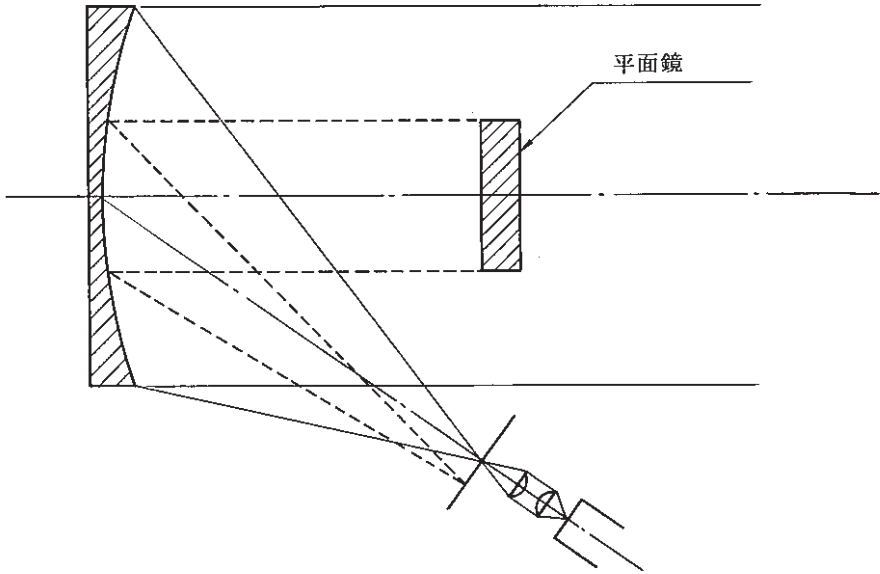


(c) シュリーレン法装置の測定部容器セルに水を満した場合

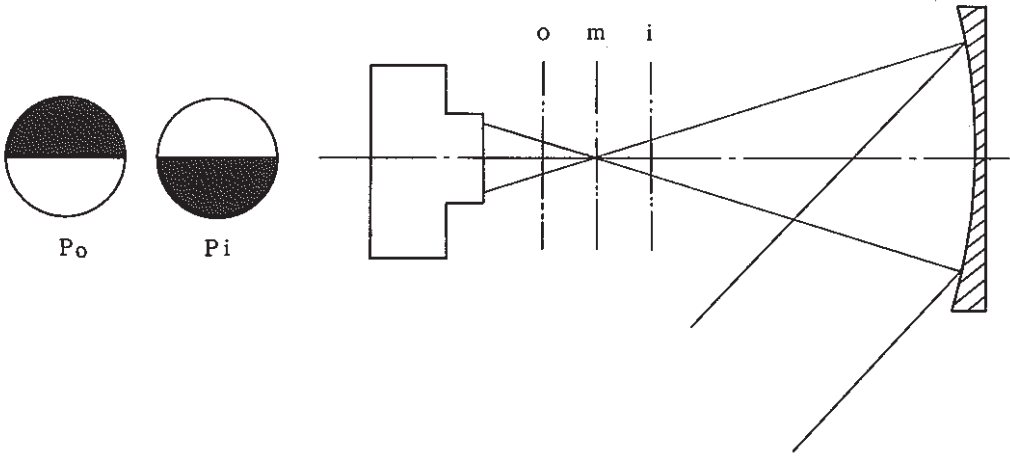
付図3.3 容器セル



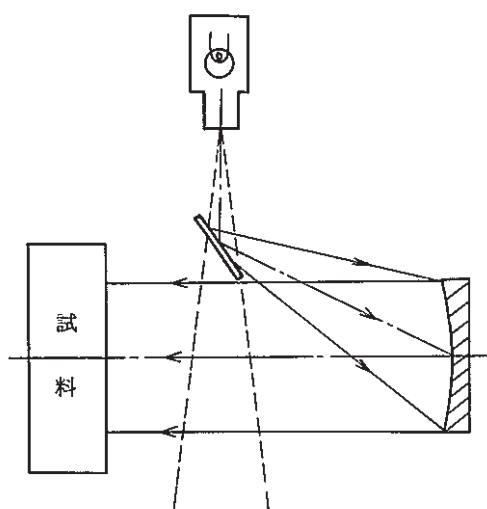
付図 3.4 配 置 方 法



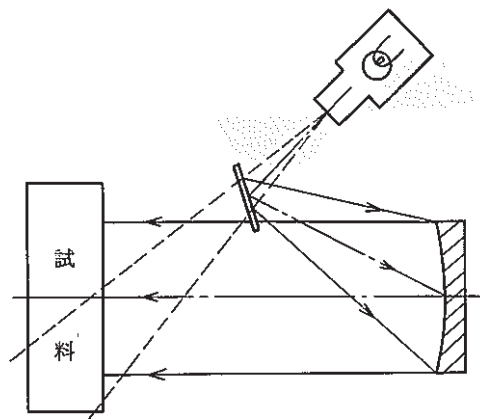
付図 3.5 試 料 の 配 置



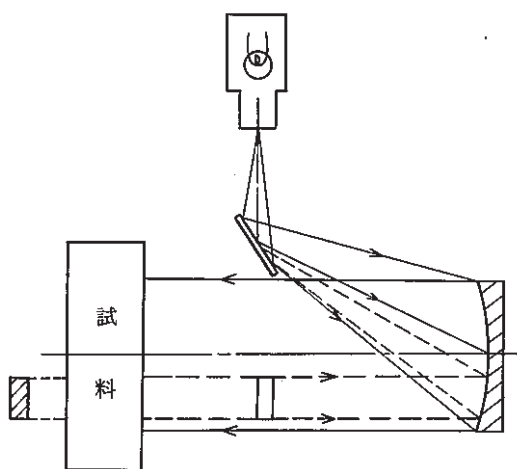
付图 3.6 焦 点 位 置



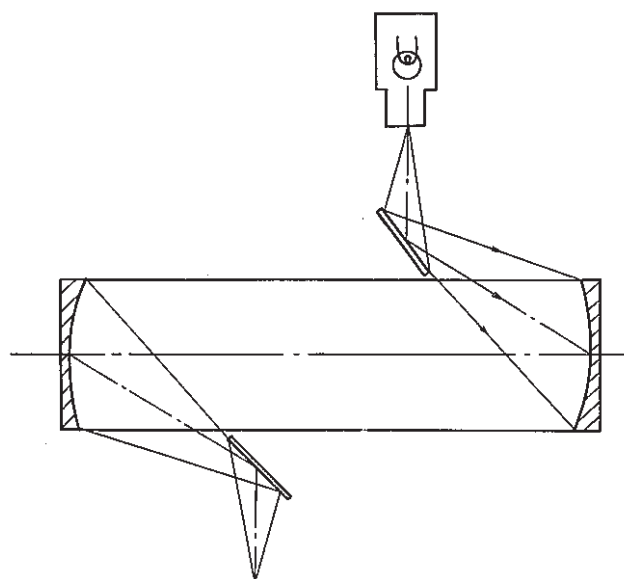
(a) 配置調整



(b) 配置調整



(c) 配置調整



(d) 配置調整

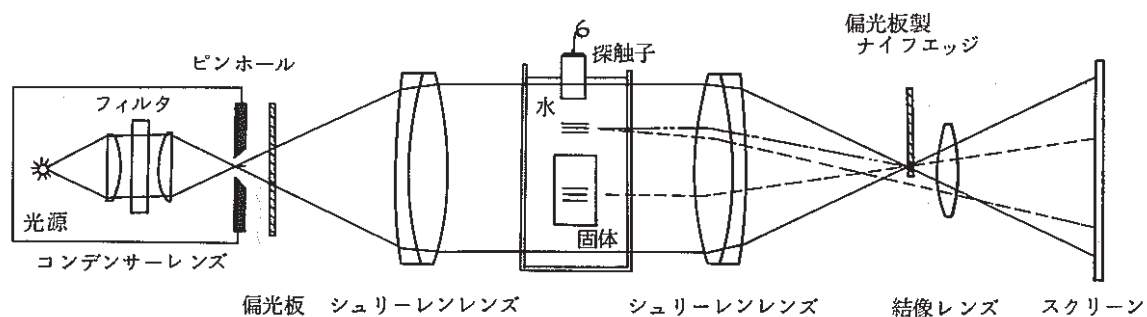
付図 3.7 配置調整図

付録4. 超音波パルスの可視化装置の原理と基本光路

4.1 偏光シュリーレン法の原理

透明な液体を平行光が通過する際、超音波パルスによって生じた物理的な不均質状態が屈折率の場の勾配となって与えられて、平行光が曲げられ明暗の影となって観測できる。同時に、等方等質かつ透明な固体に超音波パルスによって外力を加えると、応力が生じ一時的異方性により光学的には複屈折すなわち光弾性効果を示す。

前者はシュリーレン法の原理、後者は光弾性実験法の原理によって、水中と固体中の超音波パルスを同時に観察することができる。

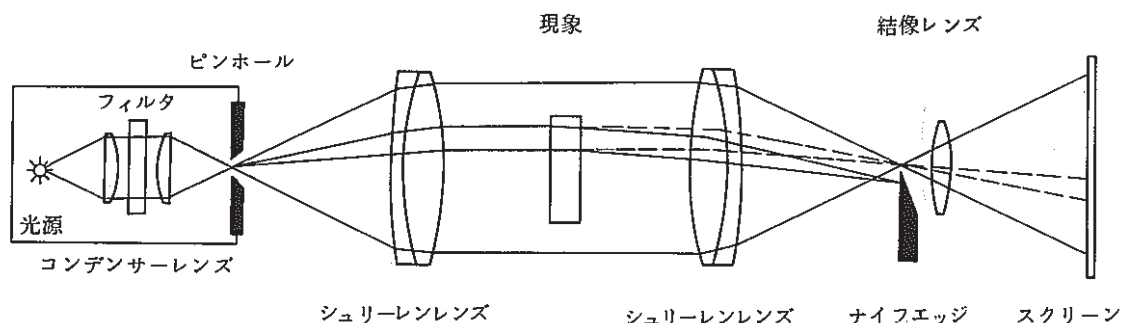


付図 4.1 偏光シュリーレン法の基本光路

4.2 シュリーレン法の原理

透明な気体液体および固体中の物理的または化学的な不均質状態が、屈折率の場の勾配として与えられているとき、ここを通る光が曲げられ、明暗の影となって観測できる。

点光源またはスリットからの光を、レンズと凹面鏡等で一定方向に進行する光束とし、これが被検物を通過した後、この光束を収斂させ、その焦点にナイフエッジを置き適当な明るさの視野に絞ると、ナイフエッジの刃に近づく方向に屈折された部分は暗く、刃から遠ざかる部分は明るくなり、被検物の密度分布が明暗のコントラストとして観察できる。

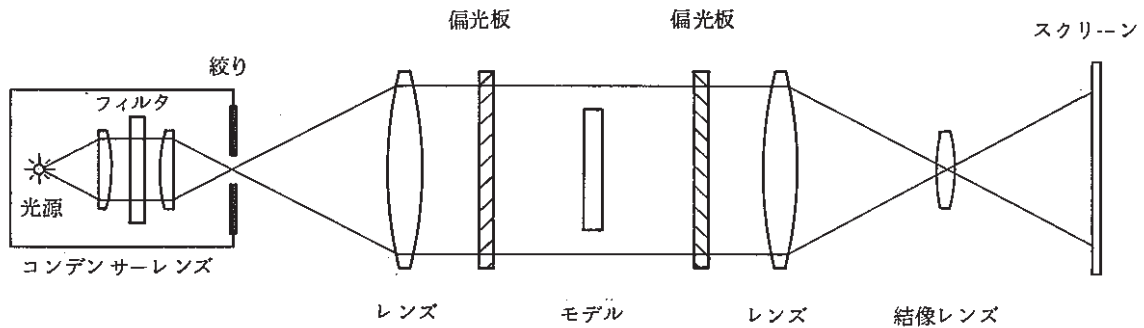


付図 4.2 シュリーレン法の基本光路

4.3 光弾性実験法の原理

等方等質、且つ透明な弾性体に外力を加えると、応力を生じ一時的異方性により、光学的には複屈折、即ち、光弾性効果を示す。

光弾性効果の顕著な物質を用いて被測定構造物に等しい形状の縮小または拡大モデルを作成し、偏光をこれに垂直に入射させ外力を加えると、モデル板中を進行する光線は主応力方向に振動する二つの平面偏光となって、これ等の二光線が主応力差に比例する位相差を生じ、これが検光子を経て光の干渉による縞として観測できる。



付図 4.3 光弾性実験法の基本光路

付録5. ナノパルスライト

5. ナノパルスライト

5.1 性 能

- (1) 閃 光 時 間 : 約 180 n sec (半値幅)
- (2) 立 上 が り 時 間 : 約 50 n sec (10 ~ 90 %)
- (3) 閃光入力エネルギー : 約 40 mJ / pulse ($1 / 2 CV^2$)
- (4) 同 期 周 波 数 : 1 ~ 100 Hz
- (5) 同 期 入 力 : 1 ~ 10 VP (正または負パルス波)
- (6) 接 点 周 期 : MAKE または BREAK
- (7) カメラ接点同期 : X 接点
- (8) 閃光遅延ジェッタ : 約 50 n sec
- (9) 電 源 : AC100 V 50 ~ 60 Hz 20 W

5.2 構 成

- (1) 本 体 : NP-1 型 (付図 5.1)
- (2) ランプハウス : NPL-5 (付図 5.2)
- (3) 電源ケーブル

5.3 操作箇所説明

- (1) 本 体
 - ① 同期入力 BNC コネクタ (入力電圧 : 1 ~ 10 VP, 接点 : MAKE または BREAK)
 - ② 信号切り換えスイッチ (SIGNAL : 電気パルス, CONTACT : 機械的接点)
 - ③ 信号の極性切り換えスイッチ (POS ; 正パルス, NBG : 負パルス)
 - ④ 入力信号レベル調整用可変抵抗器
 - ⑤ 単発フラッシュ動作切り換えスイッチ
 - ⑥ 単発フラッシュ発光 (FRASH), 連続発光 (REPEAT) 切り換えスイッチ
 - ⑦ カメラ X 接点接続コネクタ
 - ⑧ 信号同期単発フラッシュ (SYNC.F) 動作時のリセット押釦スイッチ
 - ⑨ リセット状態標示 LED
 - ⑩ SYNC.F 時の手動発光用押釦スイッチ
 - ⑪ 信号出力 BNC コネクタ (出力電圧 : 約 5 VP 正パルス波無負荷)
 - ⑫ 電源スイッチ
 - ⑬ 電源用パイロットランプ
 - ⑭ フューズホルダ

- ⑮ アースターミナル
- ⑯ 電源ケーブル接続用コネクタ (AC 100 V)
- ⑰ ランプケーブル接続用コネクタ
- ⑱ 高圧電源スイッチ

(2) ランプハウス

- ① 取付フランジ
- ② クセノン放電管 (FX-63QN)
- ③ ランプケーブル
- ④ アクリルカバー

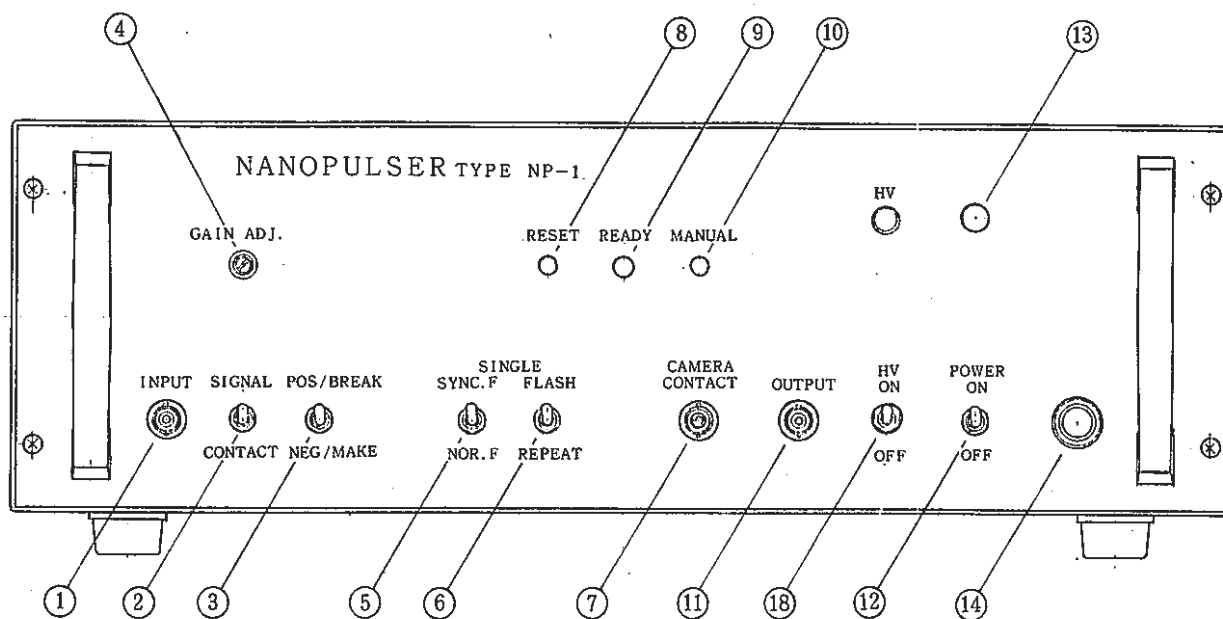
5.4 取扱説明

- (1) ランプハウスのケーブル③のプラグを本体背面のコネクタ⑰ LAMPに接続する。次に付属の電源ケーブルを本体⑯のコネクタに接続し、本体の電源スイッチ⑱をOFFにしてから、電源ケーブルのプラグを 100 V 50 ~ 60 Hz のコンセントに接続する。
- (2) 上記のケーブルの結線が終わると、装置を動作させる。装置は外部からの同期信号に同期して発光する。同期信号が正パルスの場合は 1 ~ 10 VP の範囲が適正電圧である。同期信号は①の INPUT の BNC コネクタに供給する。

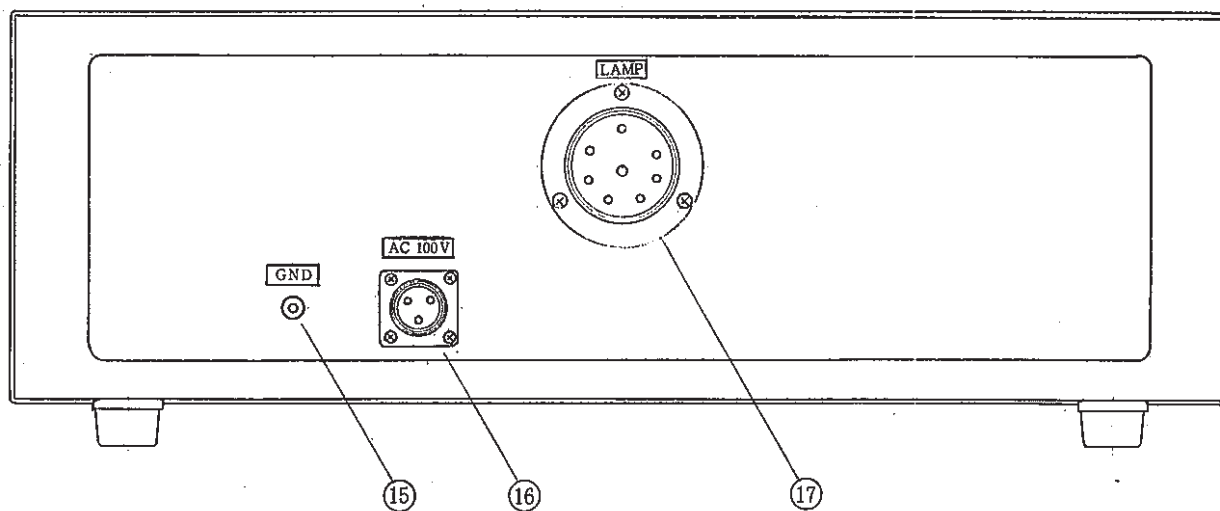
この場合スイッチ②は SIGNAL 側に設定する。信号が正パルスならば、スイッチ③は POS. 側に設定する。

- (3) 信号に同期し連続発光を行う場合は、スイッチ⑥は REPEAT の方に設定する。これ等の設定が終わると、電源スイッチ⑱と高圧スイッチ⑲を ON にする。発光部は信号に同期して点灯する。なお、本器の応答周波数範囲は 1 ~ 50 Hz である。特に上限の 50 Hz を越える周波数になるとミス発光を生じ、装置を損ずることがあるので 50 Hz を越える信号は入れないこと。入力信号が負パルス波の場合は、スイッチ③を NEG. の法に設定する。
- (4) 装置は連続発光動作のほかに、単発発光動作が行なえる。単発発光動作は、連続的な信号 (例えば 50 Hz) の中の一発の信号に同期させ発光させるものである。この場合の主な使用目的は、動的現象、特に繰り返し現象の写真撮影を行う場合に使用する。方法として、動的現象から同期信号を取り出し、この信号を本装置の INPUT ①に入力する。そしてスイッチ⑥を FRASH の方に設定し、スイッチ⑤を SYNC.F の方に設定する。この⑤⑥のスイッチを上記の通りに設定すると、入力信号を供給しても発光しない。この状態で押釦スイッチ⑩の代わりに⑦の CAMERA CONTACT の BNC コネクタにカメラの X 接点を接続しシッターを押すとシャッターが開いた時、信号に同期して一回発光する。

- ただしこの場合、シャッタ時間は信号の周期より長い時間に設定すること。例えば信号が50 Hz の場合はシャッタ時間は1/30 のレンジに設定すること。
- (5) カメラのX接点に同期させる場合はX接点を①のINPUTのBNCに接続し、スイッチ⑥をREPEAT側に設定しスイッチ②をCONTACT側に、スイッチ③をMAKB側に設定しカメラのシャッタを押すと、X接点に同期して一回発光する。
- (6) 出力BNCコネクタ⑩OUTPUTは発光と同期出力信号が得られる様になっており、出力電圧は約5 V Pの正パルスになっている。
- (7) ④のGAINADJ.は入力信号レベルに応じて可変するものであるが、ノイズを含んだ信号や歪波形信号の場合同期がかかりにくい場合にこのLEVEL ADJ.により調整する。
- (8) ⑧RESETの押釦スイッチ⑥がREPEAT側に設定されている場合、押す毎に発光する。スイッチ⑥がPLASH側に設定されている場合はスイッチ⑩を押してからスイッチ⑧を押さないと発光しない。ただしこの場合は、スイッチ⑥がSYNC.F側の時でスイッチ⑤がNOR.Fの場合は⑩と⑧のスイッチ動作が逆になる。
- (9) 装置の閃光時間は約180 n secと非常に短い光量は大きくないので、出来るだけ集光して使用すること。影絵撮影の場合は十分な光量を得ることができる。装置の光源は約4 mm×1 mmと光源が小さいので、シュリーレン法装置用光源(高速現象用)として使用が可能。

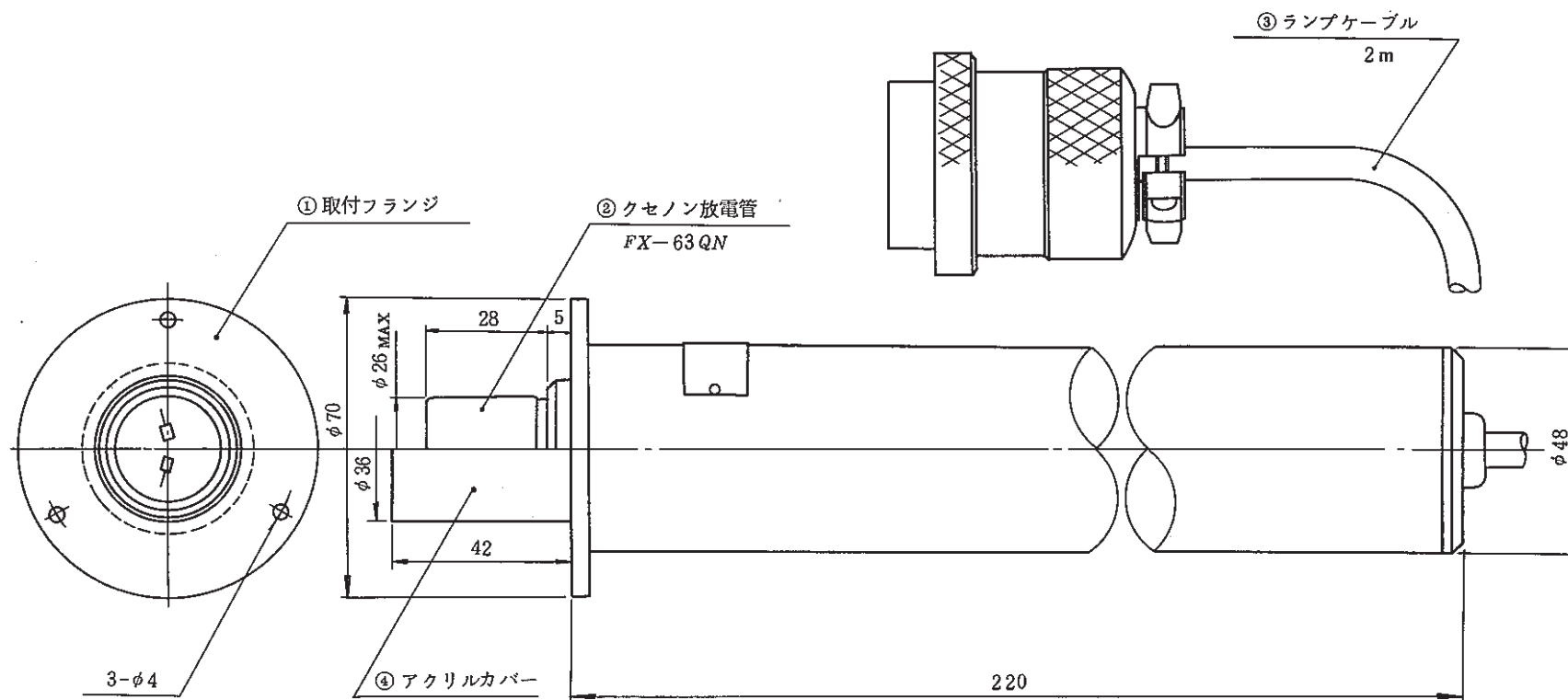


(a) 正面図



(b) 裏面図

付図 5.1 ナノパルスライト本体



付図 5.2 ランプハウス

付録6. 偏光板

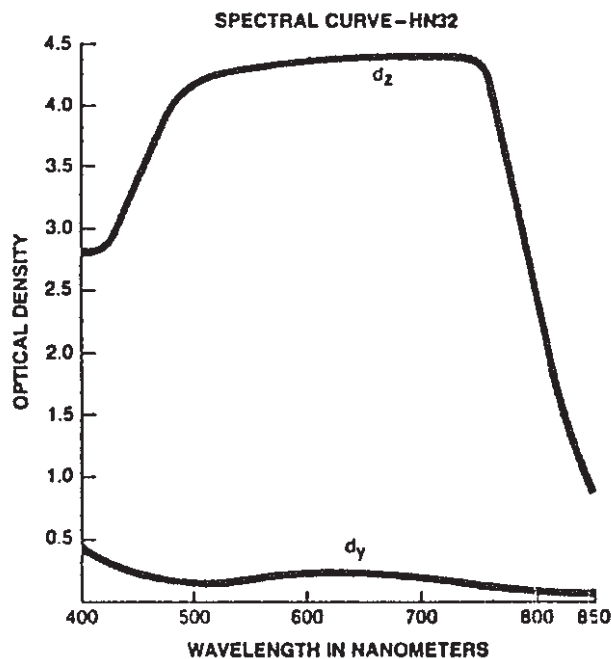
6.1 Polaroid Type HN32 Linear Polarizer for Visible Radiation

The HN32 polarizer is a neutral-color linear polarizer of the polyvinyl alcohol-iodine type for the visible region of the electromagnetic spectrum. It can also be used for a part of the near infrared region up to about 850nm. It has a total luminous transmittance of approximately 32% and an extinction transmittance of about 0.005%. It represents the best balance between transmission and extinction for general use. It is recommended for variable density filter systems, photoelastic stress analysis and other applications where modulation of light is necessary.

6.2 Spectral Properties

The spectral properties of HN32 are presented below in a spectral curve and a table of spectral values. The components d_z and d_y of the spectral curve represent the maximum and minimum optical densities, respectively. The optical densities are obtained when the filter is measured against an incident beam of 100% linearly polarized radiation.

KV is the luminous transmittance of a single filter for unpolarized white light. H0 and H90 are the luminous transmittances for unpolarized white light of two single filters in the parallel and crossed positions, respectively. The spectral values given are considered typical. Actual values will depend on the actual luminous transmittance of the sample. Transmittance tolerances are as follows: KV = 32% $\pm$ 3% H90 = 0.005% nom., 0.01% max.



付図 6.1 Spectral Curve - HN32

付表 6.1 Spectral Values - HN32

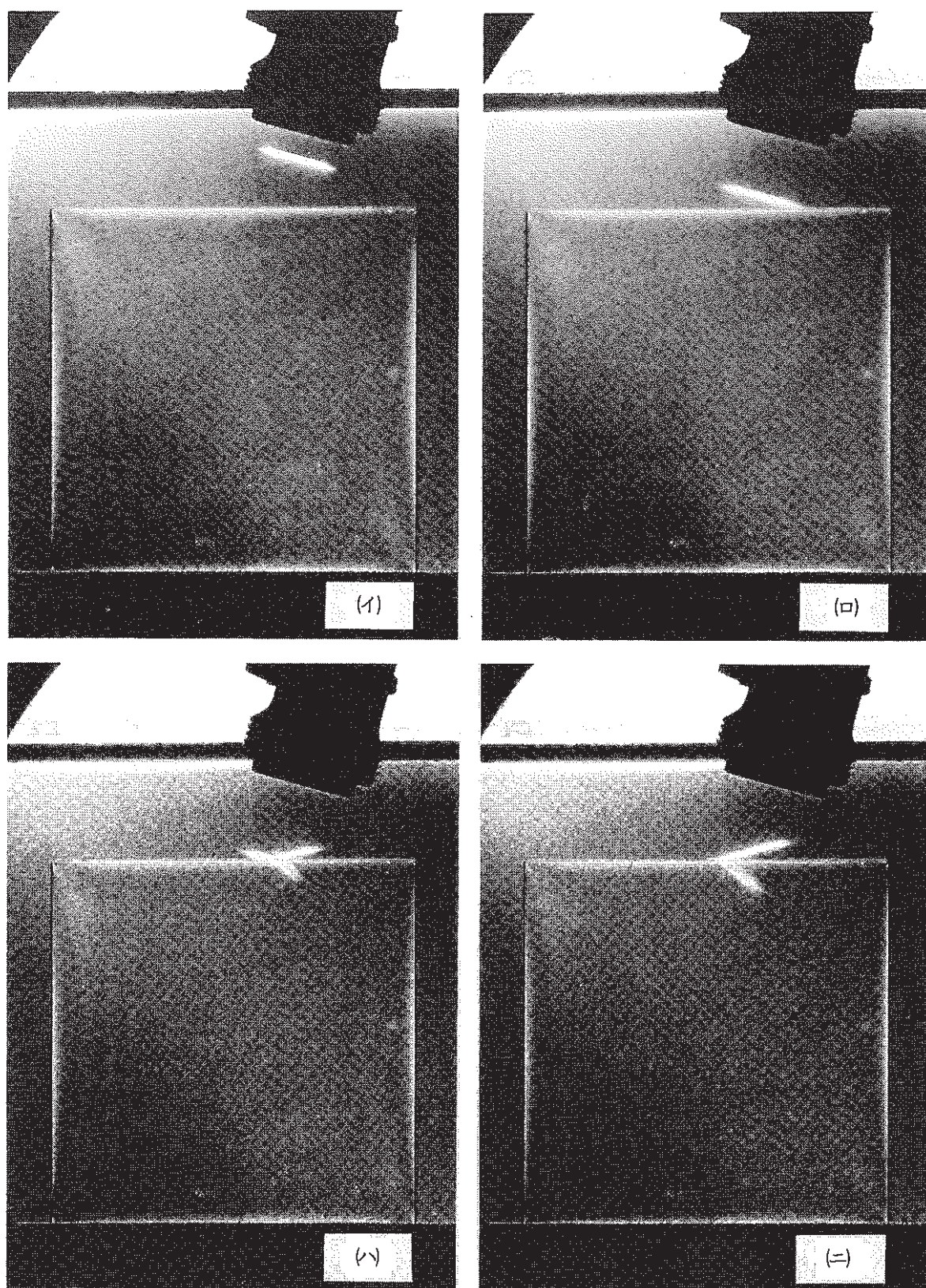
Wavelength, nm	d_y	d_z	% Transmittance	Parallel	Crossed
400	.435	2.82	18.4	6.74	.0559
410	.357	2.82	22.1	9.66	.0665
420	.305	2.92	24.8	12.3	.0592
430	.268	3.10	27.0	14.6	.0432
440	.242	3.30	28.7	16.4	.0286
450	.216	3.51	30.4	18.5	.0187
460	.200	3.70	31.6	19.9	.0126
470	.182	3.87	32.9	21.8	.00895
480	.170	4.04	33.8	22.9	.00612
490	.162	4.14	34.4	23.7	.00496
500	.157	4.21	34.8	24.3	.00434
510	.154	4.26	35.1	24.6	.00390
520	.157	4.28	34.8	24.3	.00366
530	.162	4.30	34.4	23.7	.00346
540	.168	4.32	34.0	23.1	.00328
550	.173	4.33	33.6	22.5	.00318
560	.179	4.35	33.1	21.9	.00297
570	.185	4.37	32.7	21.3	.00278
580	.189	4.38	32.4	20.9	.00273
590	.193	4.38	32.1	20.6	.00268
600	.195	4.40	31.9	20.4	.00253
610	.196	4.42	31.8	20.3	.00244
620	.195	4.42	31.9	20.4	.00242
630	.192	4.43	32.1	20.7	.00240
640	.192	4.43	32.1	20.7	.00237
650	.185	4.43	32.7	21.3	.00240
660	.180	4.44	33.0	21.8	.00239
670	.173	4.44	33.6	22.5	.00242
680	.165	4.44	34.2	23.4	.00247
690	.155	4.44	35.0	24.5	.00256
700	.145	4.44	35.8	25.6	.00259
710	.136	4.44	36.6	26.7	.00264
720	.127	4.44	37.3	27.9	.00270
730	.119	4.44	38.0	28.9	.00275
740	.107	4.43	39.1	30.5	.00290
750	.098	4.41	39.9	31.8	.00313
760	.091	4.27	40.6	32.9	.00432
770	.082	3.99	41.4	34.3	.0104
780	.074	3.47	42.2	35.6	.0286
790	.067	2.93	42.9	36.7	.100
800	.063	2.44	43.4	37.4	.312
810	.057	2.01	44.3	38.5	.863
820	.054	1.65	45.3	39.0	1.97
830	.050	1.34	46.8	39.8	4.06
840	.047	1.09	48.9	40.6	7.38
850	.045	0.87	51.8	41.5	12.13

KV = 33.2%

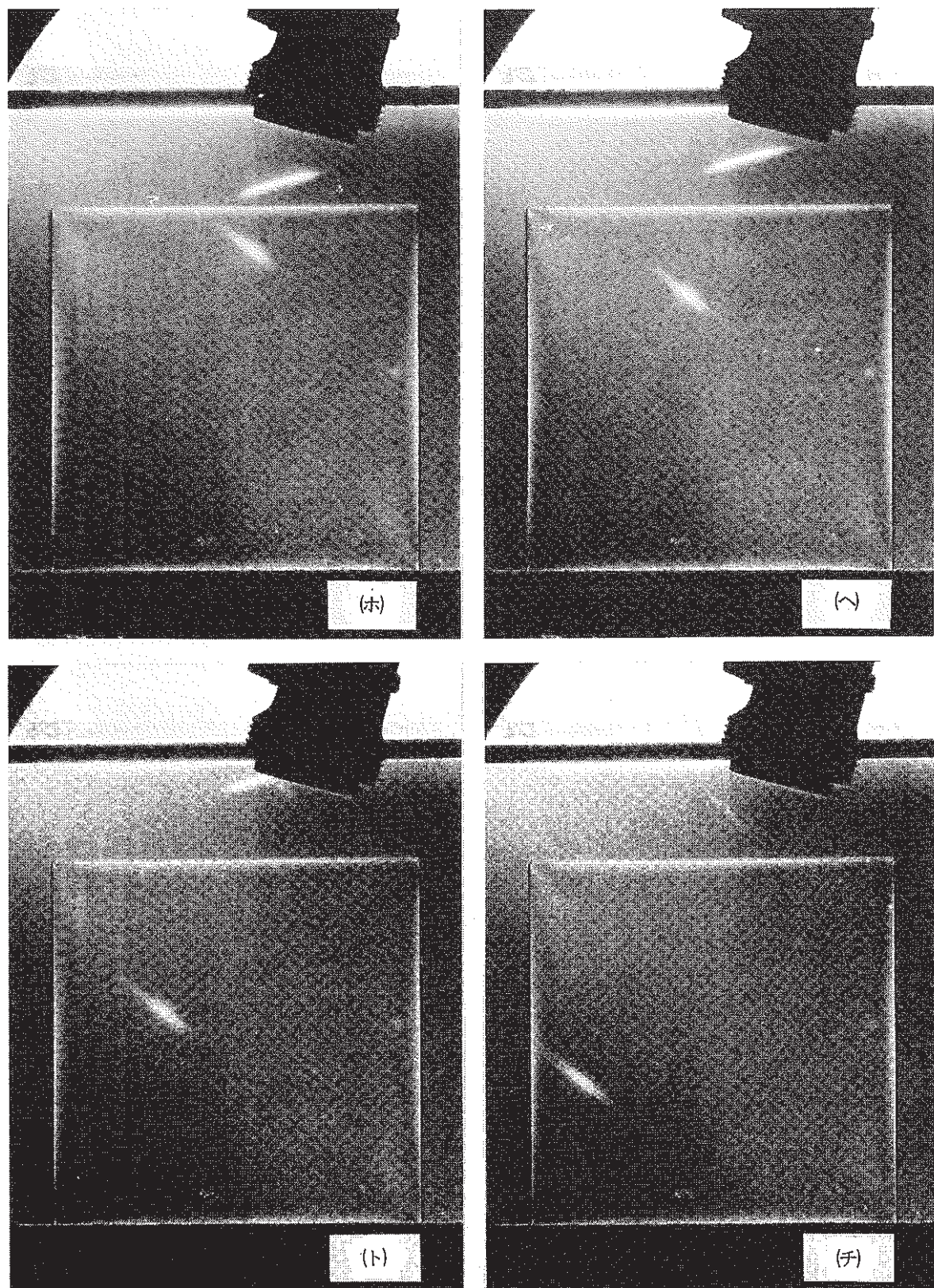
H0 = 22.1%

H90 = .00348%

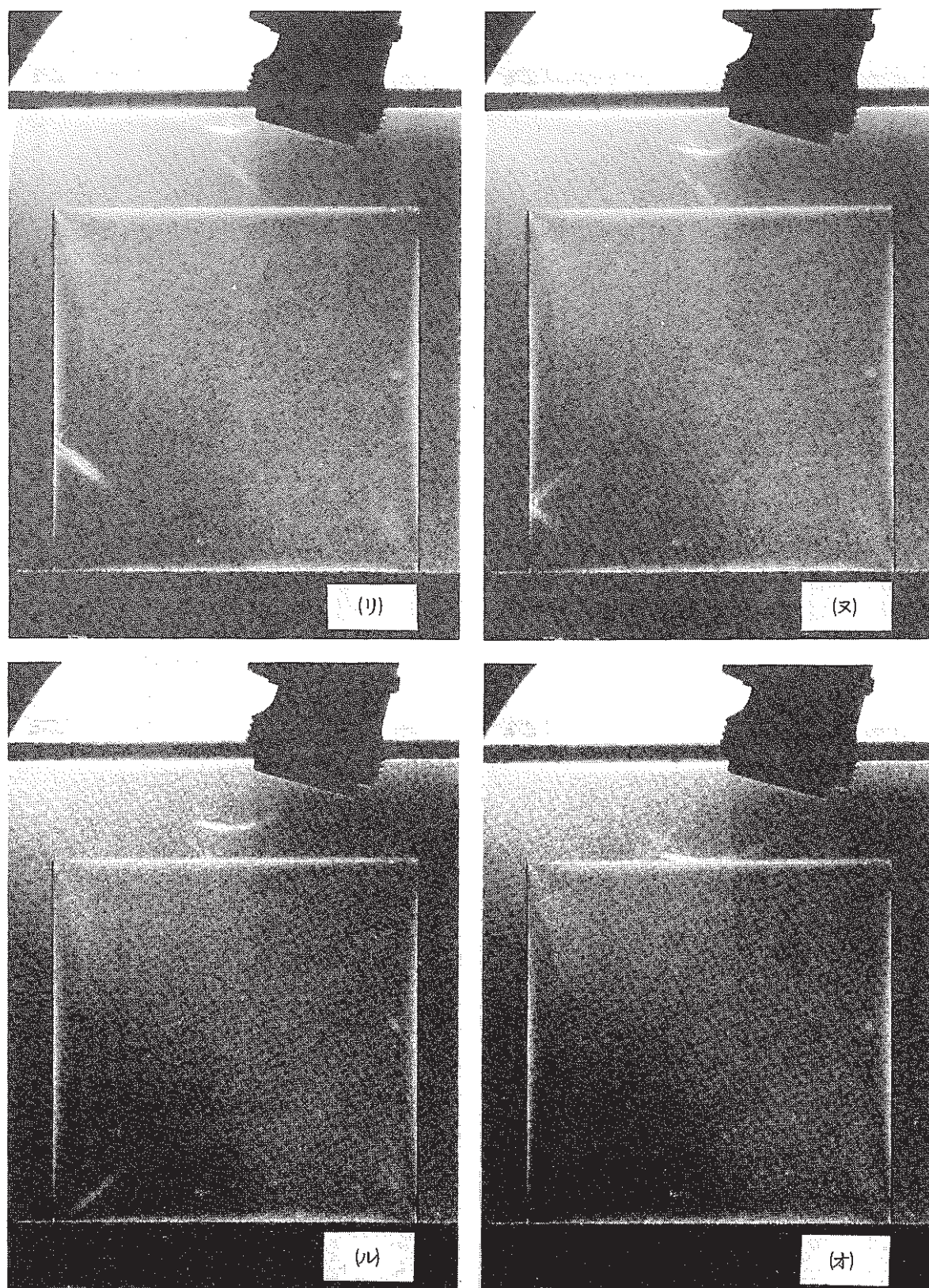
付録7. 超音波パルスの可視化像



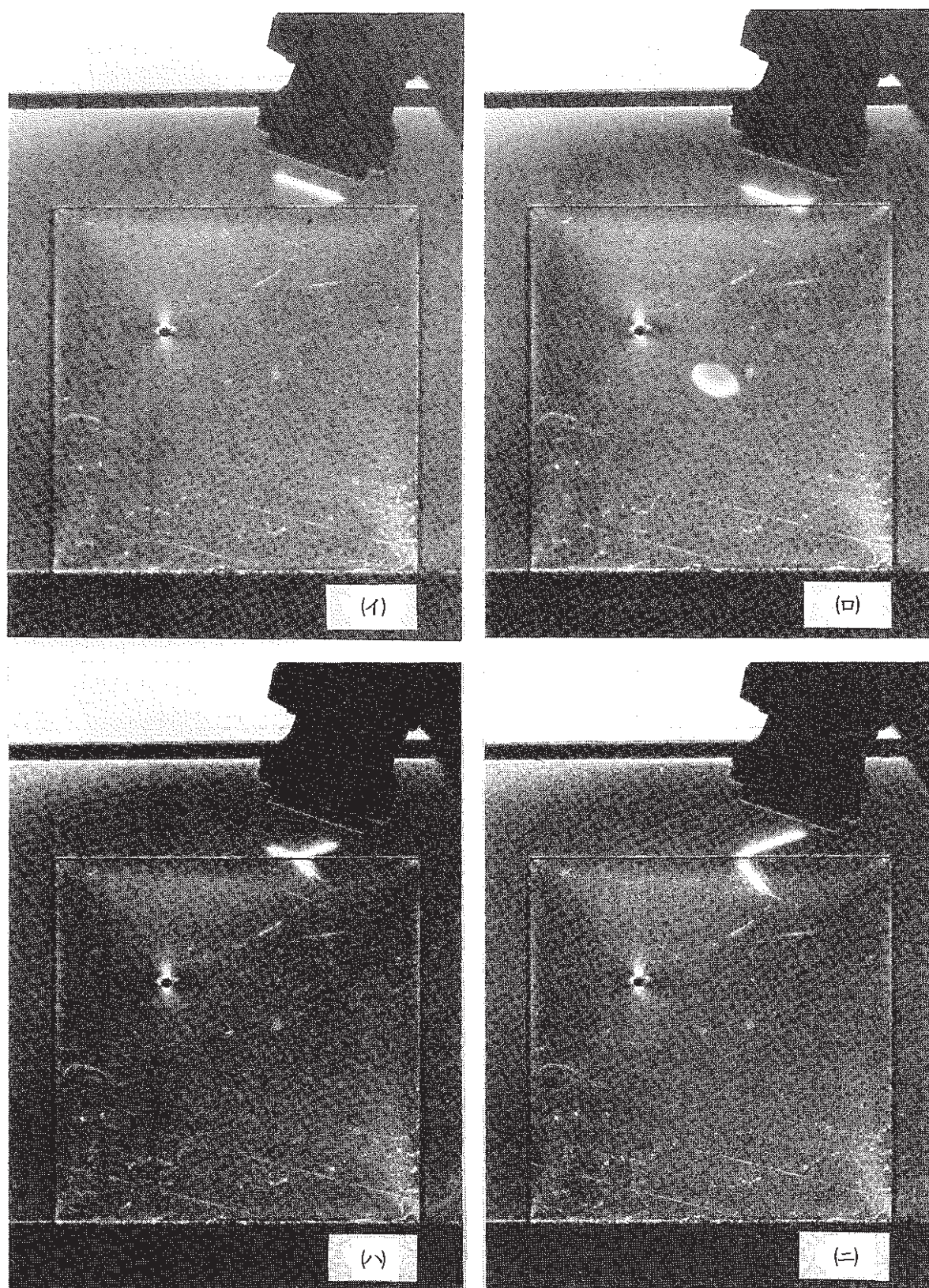
付図 7.1(a) 偏光シュリーレン法装置による超音波パルスの可視化像



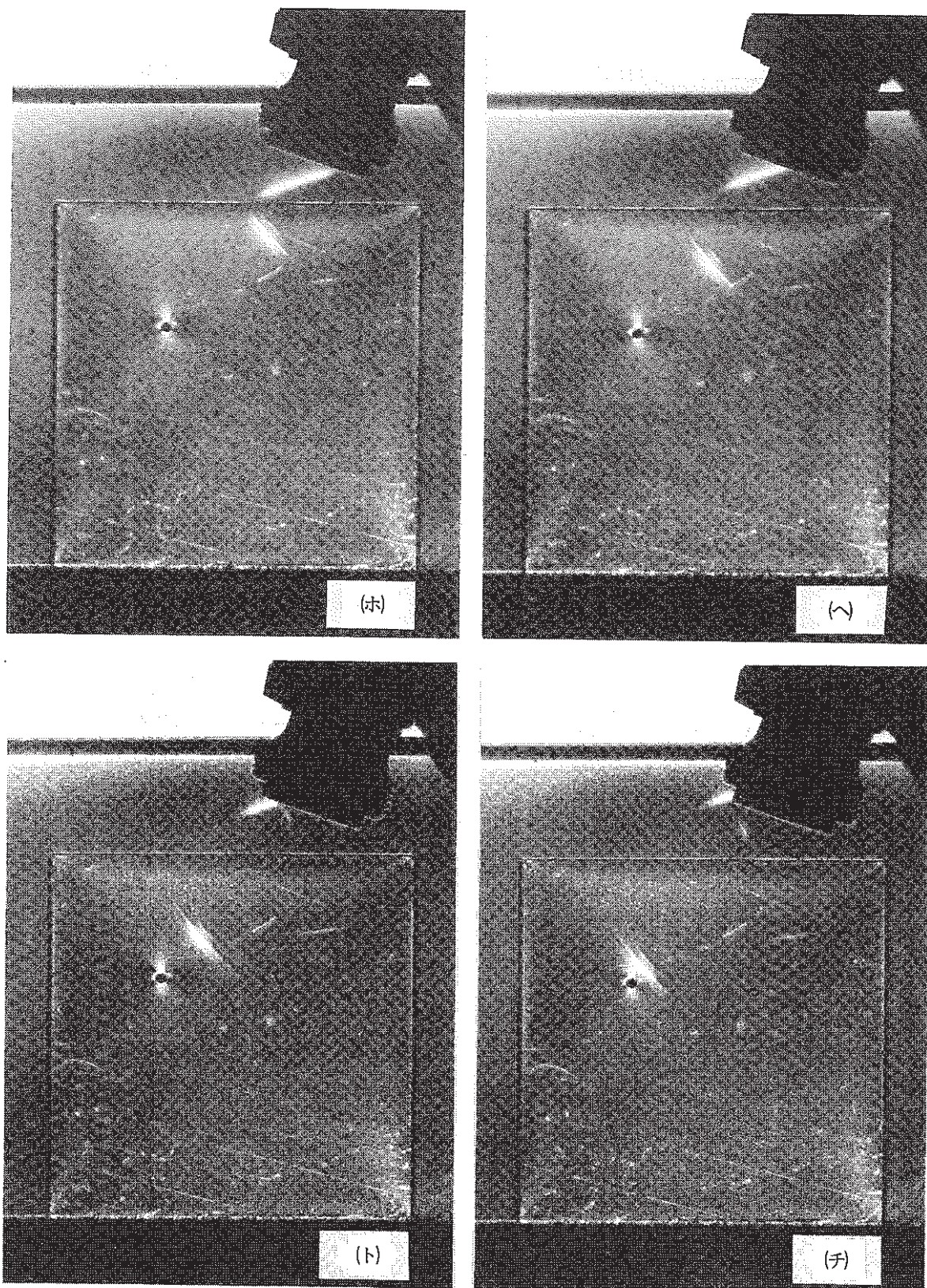
付図 7.1 (b) 偏光シュリーレン法装置による超音波パルスの可視化像



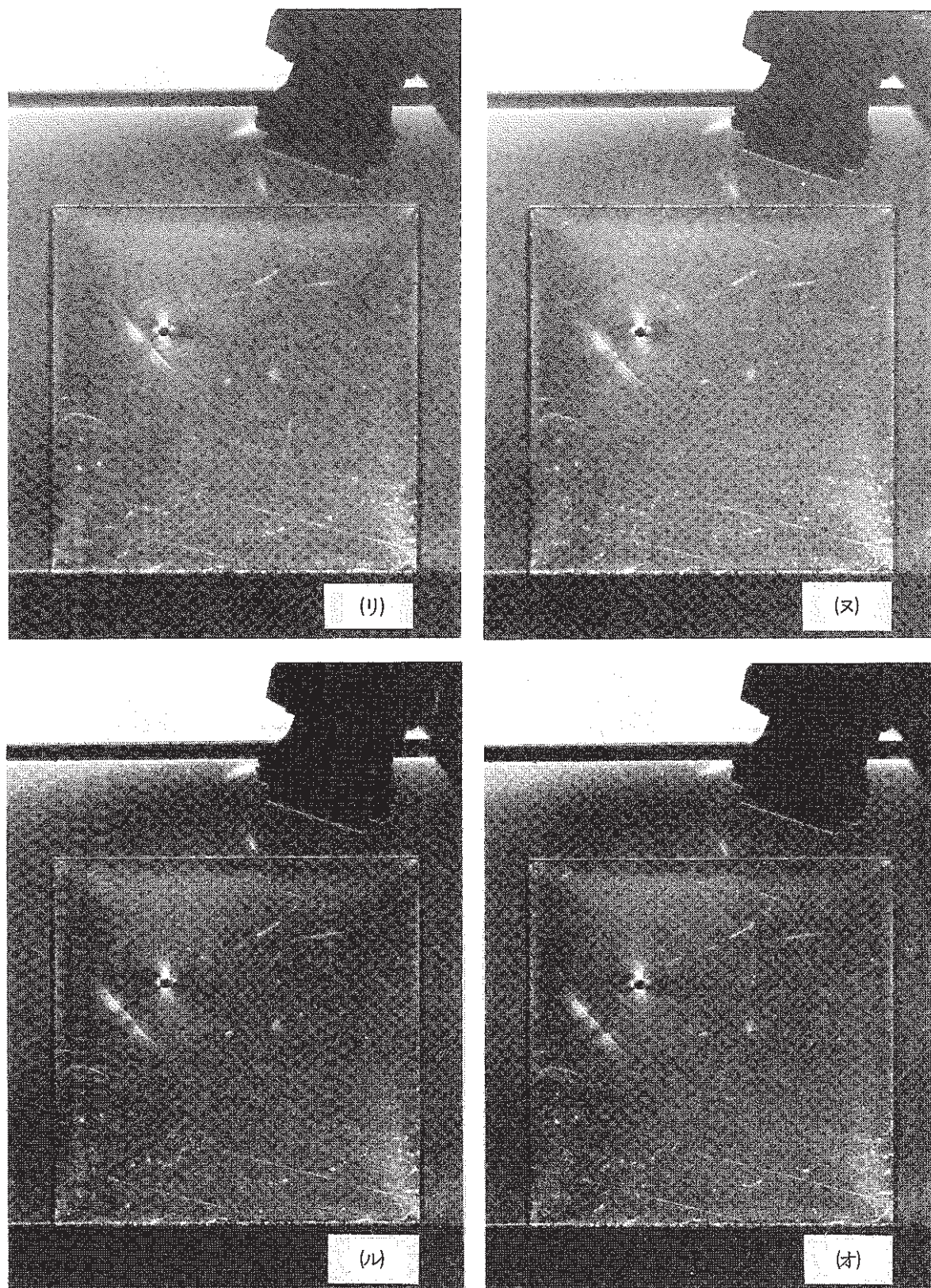
付図 7.1(c) 偏光シュリーレン法装置による超音波パルスの可視化像



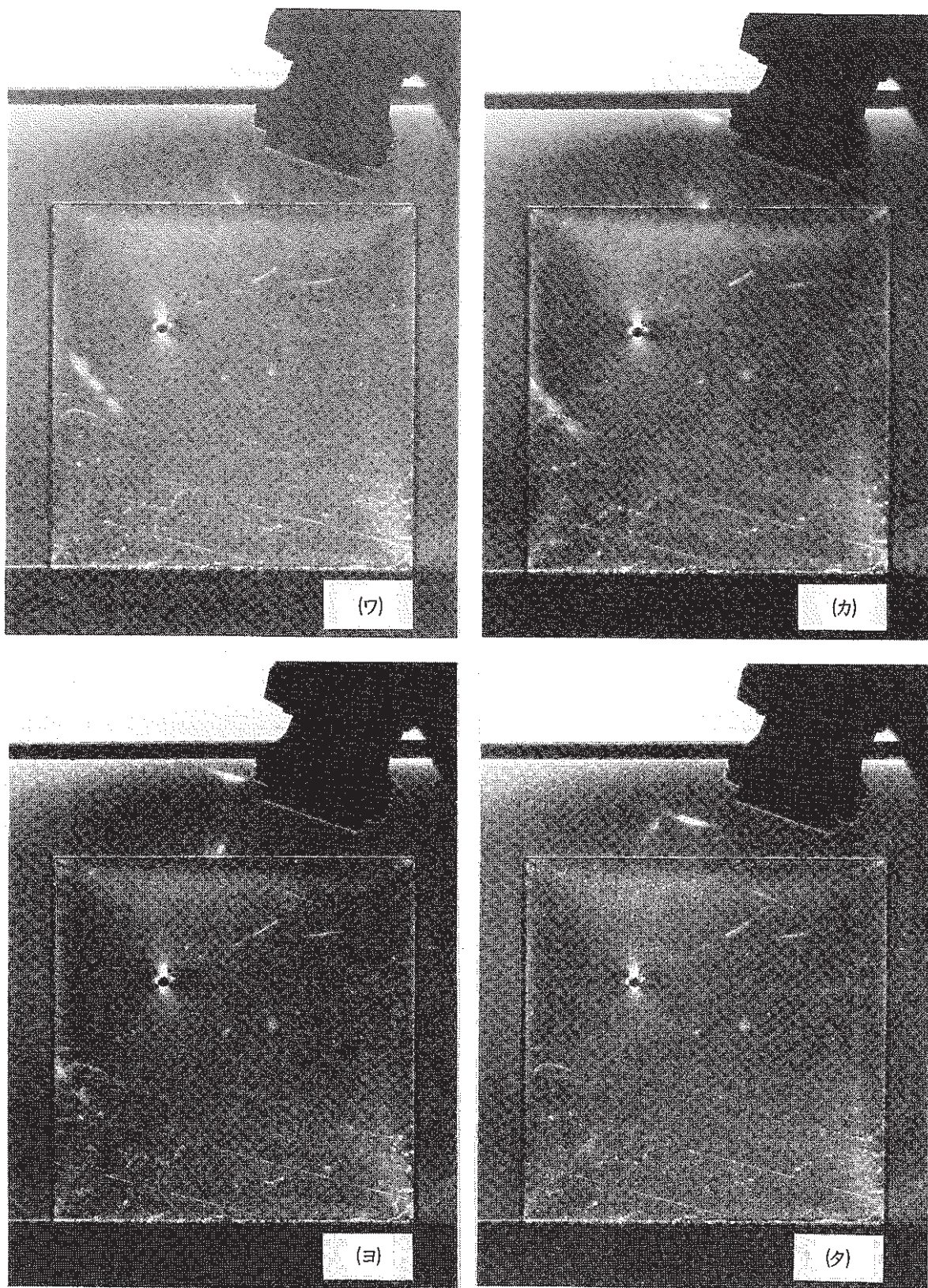
付図 7.2(a) 偏光シュリーレン法装置による超音波パルスの可視化像



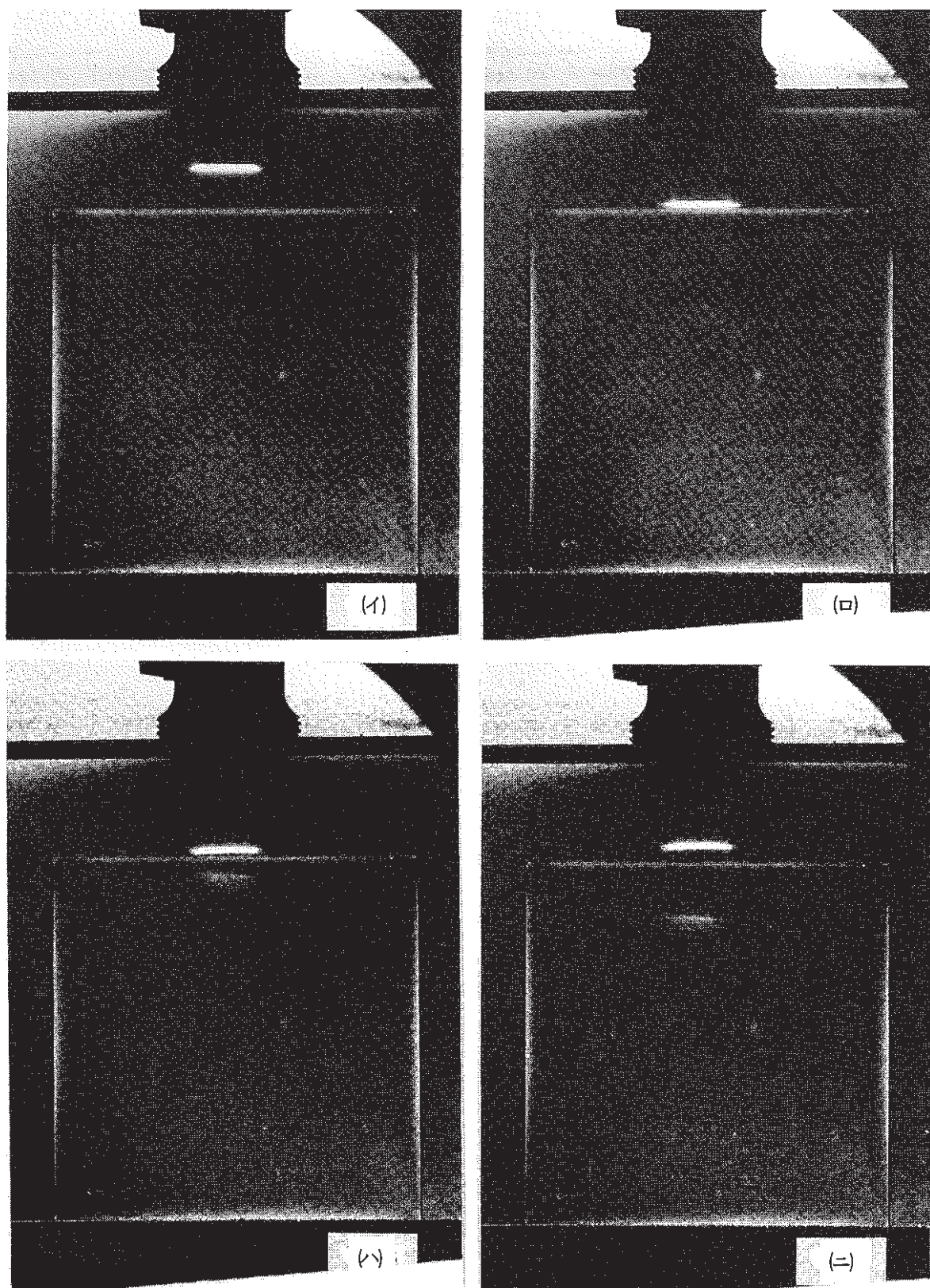
付図 7. 2 (b) 偏光シュリーレン法装置による超音波パルスの可視化像



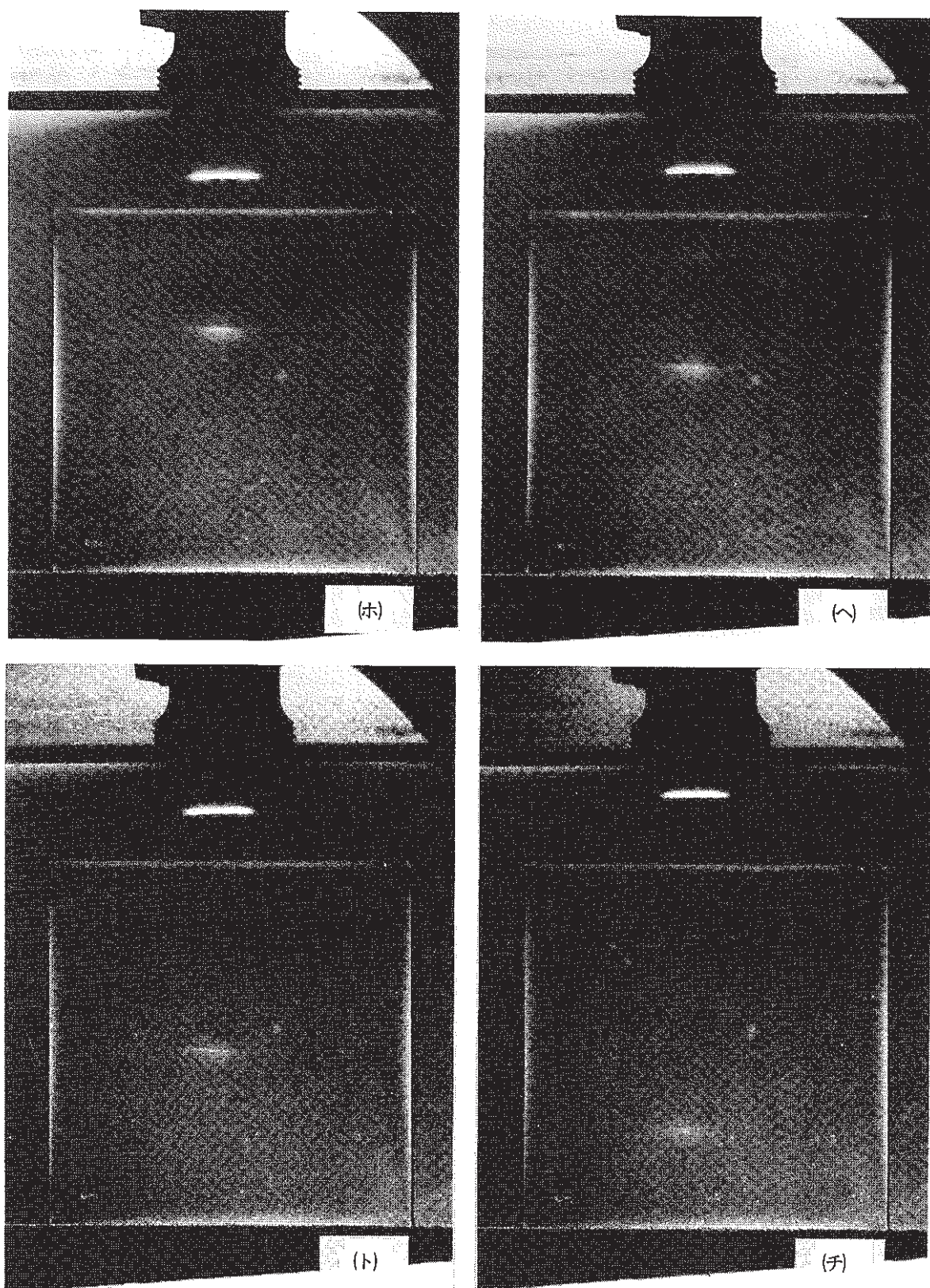
付図 7.2(c) 偏光シュリーレン法装置による超音波パルスの可視化像



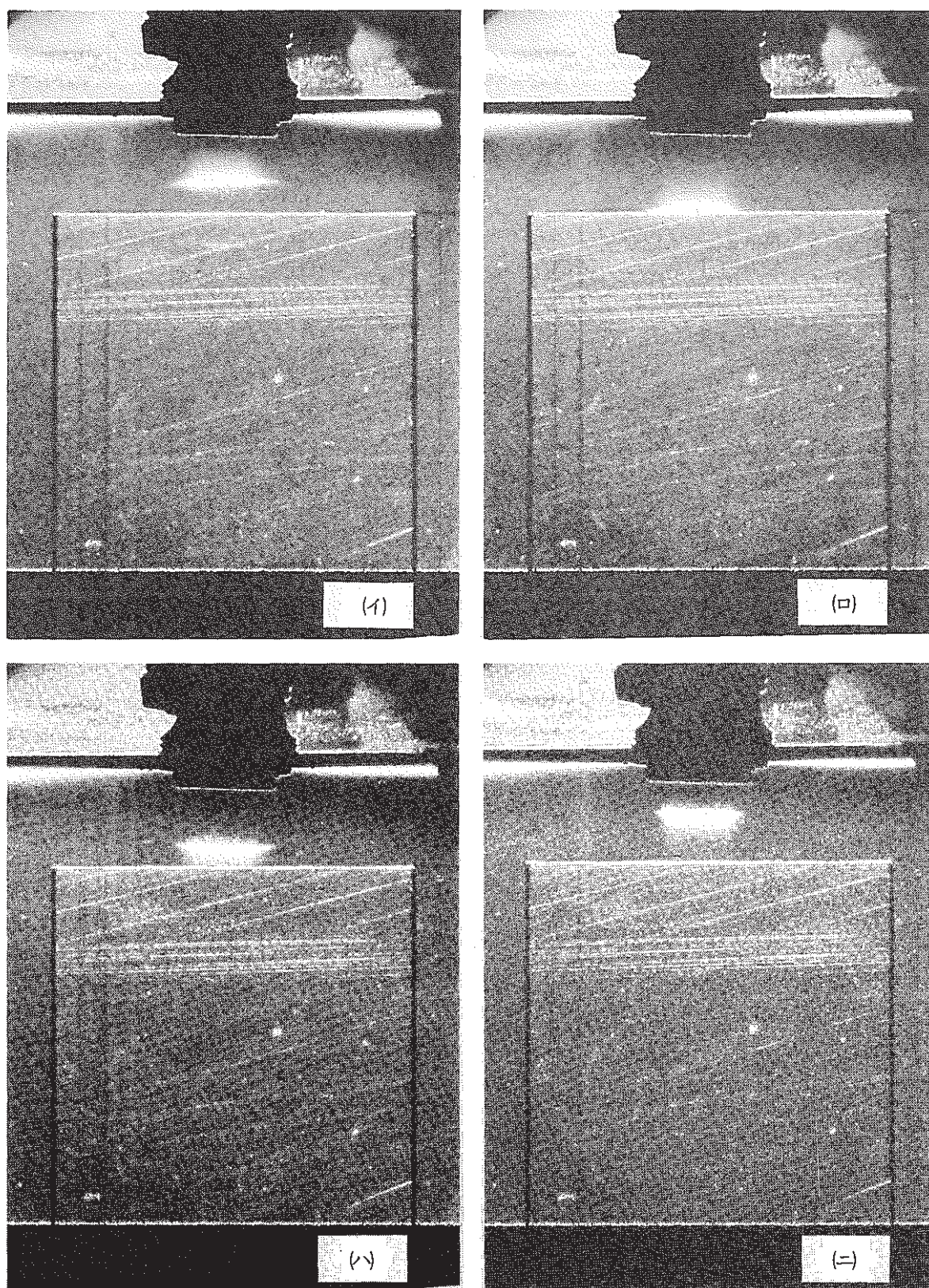
付図 7.2(d) 偏光シュリーレン法装置による超音波パルスの可視化像



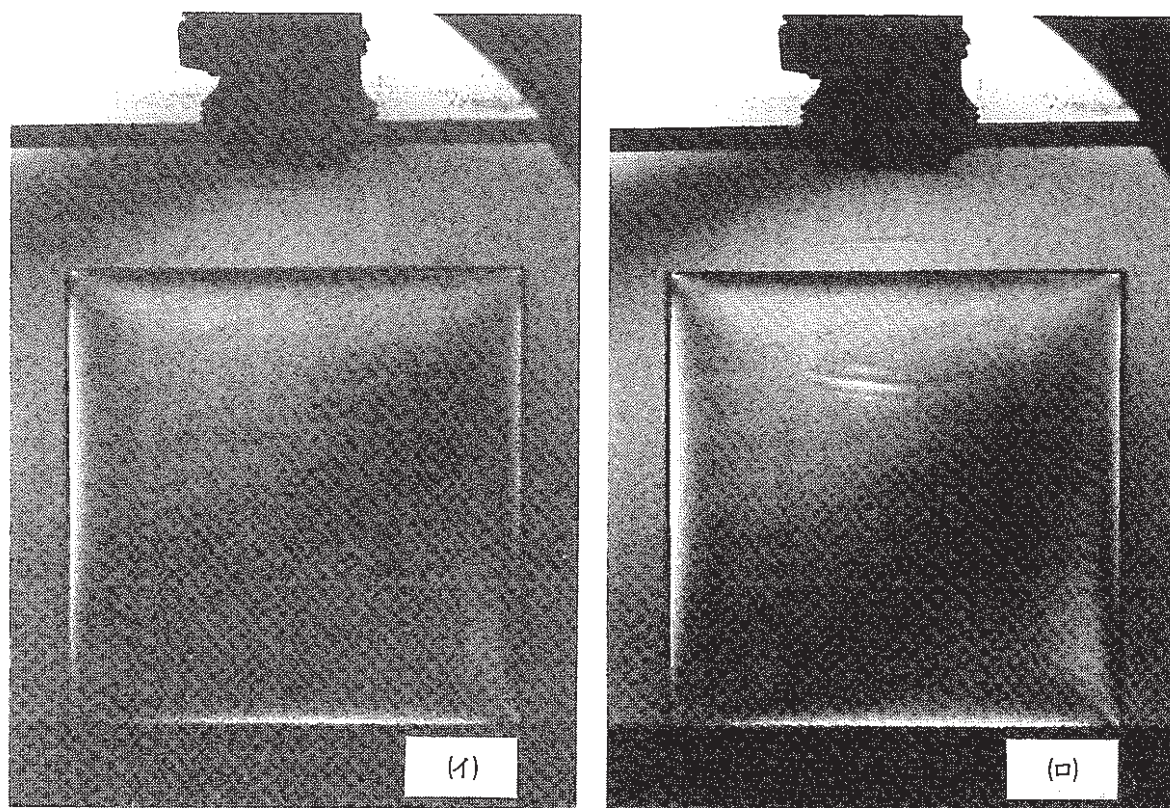
付図 7.3(a) 偏光シュリーレン法装置による超音波パルスの可視化像



付図 7.3(b) 偏光シュリーレン法装置による超音波パルスの可視化像



付図 7.4 シュリーレン法装置による超音波パルスの可視化像



付図 7.5 光弾性実験法装置による超音波パルスの可視化像