

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

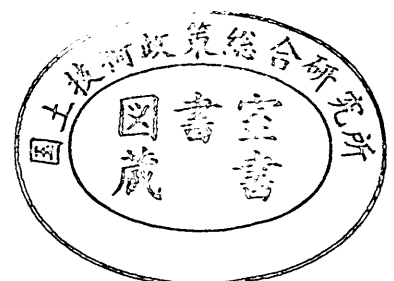
---

VOL. 37

NO. 2

June 1998

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第37巻 第2号 (Vol. 37, No. 2), 1998年6月 (June 1998)

## 目 次 (CONTENTS)

着底型杭状深層混合処理地盤の破壊挙動 .....北詰昌樹・山本浩司 .....	3
Stability of group column type DMM ground .....Masaki KITAZUME, Hiroshi YAMAMOTO	
ケーソンの安定性に及ぼす裏込めの効果 .....菊池喜昭・新舎 博・江口信也 .....	29
Effects of the back-filling to the stability of a caisson .....Yoshiaki KIKUCHI, Hiroshi SHINSHA, Shin-ya EGUCHI	
大阪湾洪積粘土の三軸せん断特性と大型護岸構造物の安定性 .....渡部要一・土田 孝・足立格一郎 .....	59
Undrained Shear Strength of Osaka Pleistocene Clay And Stability of Large Scale Seawall Structure .....Yoichi WATABE, Takashi TSUCHIDA, Kakuichiro ADACHI	
鋼管杭式棧橋の地震応答解析結果に基づく設計水平震度の考察 .....横田 弘・竹鼻直人・南 兼一郎・高橋邦夫・川端規之 .....	75
Consideration of Design Seismic Coefficients of An Open Type Wharf Based on Dynamic Response Analyses .....Hiroshi YOKOTA, Naoto TAKEHANA, Ken'ichiro MINAMI, Kunio TAKAHASHI, Noriyuki KAWABATA	
信頼性設計法による防波堤の全体系安全性 (第3報) ーレベル1, 2の設計法の適用性総括ー .....長尾 毅・大久保昇・川崎 進・林由木夫 .....	131
Evaluation of Safety of Breakwaters by the Reliability Based Design Method (3rd Report: Concluding the Applicability of Reliability Based Design Method) .....Takashi NAGAO, Noboru OKUBO, Susumu KAWASAKI, Yukio HAYASHI	
棧橋上部工の荷役機械荷重を考慮した疲労限界状態設計 .....長尾 毅・横田 弘・竹地晃一郎・川崎 進・大久保昇 .....	177
Fatigue Limit State Design Method for Superstructures of Open Type Wharves in view of Cargo Handling Machine Loads .....Takashi NAGAO, Hiroshi YOKOTA, Koichiro TAKECHI, Susumu KAWASAKI, Noboru OKUBO	

水中レーザー視認装置による画像化実験

……秋園純一・佐藤栄治・田中敏成・高橋義明・朝妻春和・小林 健・斎藤利貴 ……221

Imaging Experiments of Underwater Laser Viewing System

……Jun'ichi AKIZONO, Eiji SATO, Toshinari TANAKA, Yoshiaki TAKAHASHI,  
Harukazu ASATSUMA, Takeshi KOBAYASHI, Toshitaka SAITO

歩行式水中調査ロボットの開発

－（第4報）歩容及び軌道の実時間計画法－

……田中敏成・秋園純一・高橋英俊・佐藤栄治・鈴木健治・米田 完・  
金山 裕・Robert B. McGhee・竹内俱佳 ……259

Development of Aquatic walking Robot for Underwater Inspection

－（The 4th report）A Method of Real-time Gait, Trajectory and Path Planning－

……Toshinari TANAKA, Jun'ich AKIZONO, Hidetoshi TAKAHASHI, Eiji SATO, Kenji SUZUKI,  
Kan YONEDA, Yutaka KANAYAMA, Robert B. McGhee, Tomoyoshi TAKEUCHI

## 水中レーザー視認装置による画像化実験

秋園純一\*・佐藤栄治\*\*・田中敏成\*\*・高橋義明\*\*\*  
朝妻春和\*\*\*・小林 健\*\*\*・斎藤利貴\*\*\*

### 要 旨

港湾工事は一般に濁りのある水中で行われるため、施工管理等のための計測や水中観察には困難が伴う。特に水中観察に関しては、主として肉眼、水中写真、あるいは、水中テレビカメラに頼っているために、近距離しか見えないという問題がある。

濁水中での視認性を改善する方法には種々の方式があるが、最近の電子技術の発達によって、レーザーの水中視認への利用の実用性が高まってきた。そこで、水中レーザー視認システムの研究を開始し、設計・製作した水中レーザー視認実験装置を用いて濁水中における画像化実験を行った。

本実験装置は、光源にパルス光を使用し被写体から反射したパルス光が撮像装置に入射する瞬間の短い時間だけシャッター（ゲート）を開いてそれ以外の時間の後方散乱光を排除するレンジゲート方式を採用している。さらに波長の可変なYAG-OP0レーザーを採用し、懸濁物質の粒径により透過しやすい波長のレーザーを出力することができることが他にない特徴である。

各種の水槽実験により、最適照射出力、レーザーパルス繰返し数依存性、反射材の効果が明らかになり、従来型水中テレビカメラとの差異が明らかとなった。

キーワード: レーザー、波長可変、濁水透視、最適照射出力、最適波長

---

\* 機械技術部 ロボティクス研究室長

\*\* 機械技術部 ロボティクス研究室

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1

Phone: 0468-44-5042 Fax: 0468-44-0575 e-mail: akizono@cc.phri.go.jp

\*\*\* 石川島播磨重工業株式会社

〒135 東京都江東区豊洲3-1-15

Phone: 03-3534-3850 Fax: 03-3534-3879 e-mail: yoshiaki\_takahashi\_1@ihi.co.jp

## Imaging Experiments of Underwater Laser Viewing System

**Jun'ichi AKIZONO \***  
**Eiji SATO \*\***  
**Toshinari TANAKA \*\***  
**Yoshiaki TAKAHASHI \*\*\***  
**Harukazu ASATSUMA \*\*\***  
**Takeshi KOBAYASHI \*\*\***  
**Toshitaka SAITO \*\*\***

### Synopsis

As the port construction work is carried out in the area where the water is turbid in general, measurement and visual observation for construction control and quality control do not have sufficient efficiency and accuracy. Especially, visual observation is mainly carried out by naked eyes, underwater photography, and underwater TV camera. Therefore, the range of vision is very short.

Several techniques to improve underwater visual imaging are proposed. Recently the progress of the electronic devices makes the the practical use of laser for underwater viewing system possible. Thus, we started the development of "Underwater Laser Viewing System", and make imaging experiments with the manufactured test apparatus.

This apparatus uses ultra-short pulse laser as the light source, and open the optical gate of the camera in a very short time while the rays reflected by the object is coming back to the camera. Using this range-gating method, the effect of scattered light can be reduced and clear image is obtained. A YAG-OPO laser which is able to vary wave length is adopted to the test apparatus because there is the appropriate wave length for a combination of the turbidity and the particle size.

From the result of various pool test, the optimal projection output, effect of laser pulse interval, the effect of reflecting material, and the comparison with conventional TV camera are made clear.

**Key Words :** Laser, Variable wave length, Underwater Viewing System, Turbid water,  
Optimal output, optimal wave length

---

\* Chief of Robotics Laboratory, Machinery Division

\*\* Member of Robotics Laboratory, Machinery Division

3-1-1, Nagase, Yokosuka 239-0826 Japan,

Phone : +81-468-44-5042 Fax : +81-468-44-0575 e-mail : akizono@cc.phri.go.jp

\*\*\* Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

1-1, Toyosu 2-chome, Tokyo 135 Japan,

Phone : +81-3-3534-3850 Fax : +81-3-3534-3879 e-mail : yoshiaki\_takahashi\_1@ihi.co.jp

## 目次

1. はじめに .....	225
2. 水中レーザー視認実験装置 .....	225
2.1 水中での光の伝搬特性 .....	225
2.2 レンジゲート方式と波長可変 .....	227
2.3 実験装置 .....	227
3. 画像化実験 .....	227
3.1 最適照射パワーに関する実験 .....	228
3.2 水中レーザー視認実験装置と従来型水中テレビカメラの比較実験 .....	243
3.3 実用化のための要素実験 .....	249
4. 現場への適用 .....	254
5. 結論 .....	256
6. おわりに .....	256
参考文献 .....	257

## 1. はじめに

最近の港湾建設工事においては、大水深での大規模・急速施工が多くなってきている。このような工事での、施工管理・品質管理は従来の潜水士による直接計測や直接視認、あるいは光学式水中テレビカメラによる視認や超音波による計測技術を使用して行われているが、作業効率、精度等の一層の向上の要請がある。

特に、濁水中でのこれらの計測・視認技術は、主として肉眼及び光学式水中テレビカメラに頼っているために可視距離が極端に短く近距離しか見えないことや、超音波による計測では計測時間がかかるとともにビームの広がりによって水平分解能が低いいため、大水深工事で必要となる高速・高精度計測には必ずしも適していない。大水深・大規模・急速施工においては、この計測視認技術の優劣が工事の安全性や経済性に大きな影響を与えるため、より高速で高精度な計測・視認技術の開発が必要となっている。また、水中作業の機械化において、水中作業機械の視認装置としての要請も大きいものがある。

一方、最近、先端技術の一つであるレーザーは、特にレーザー発振器及び関連機器の安定化、小型軽量化、低価格化等が著しく進み、改めてレーザーの水中計測・視認への利用の可能性が高まった<sup>1, 2)</sup>。このようなことから、港湾工事に伴う施工管理・品質管理等の高効率化、高精度化を図るため、短パルス幅、高出力のレーザーを用いた水中視認技術の開発に取り組み、各種の基礎実験<sup>3-5)</sup>を経てレンジゲート方式で波長が可変な水中レーザー視認実験装置を設計・製作した<sup>6-8)</sup>。

この水中レーザー視認実験装置を用いて、最適照射パワー、従来型テレビカメラとの比較、レーザーパルス繰返し数依存性、反射材の種類による視認特性等の各種の画像化実験を行い、その濁水中での特徴を明らかにし、視認性能が従来型テレビカメラに比べて優れていることを確認した<sup>9-16)</sup>。

本研究はシミュレータの開発も含めた一連の水中レーザー視認システムの研究の一環である。表-1に水中レーザー視認システムの研究の全体計画を示す。

## 2. 水中レーザー視認実験装置

### 2.1 水中での光の伝搬特性<sup>17-23)</sup>

図-1に水中での光の伝搬の模式図を示す。光が水中を伝搬するとき、水分子及び浮遊粒子によって吸収されて減衰する。この減衰は、減衰係数 $\alpha$ （光の強度が $1/e$ になる伝搬距離の逆数）によって定義される。

また、浮遊粒子に当たった光は反射して散乱され周囲に広がる。このうち光源方向に戻ることを後方散乱と言う。散乱した光は他の粒子によって再度散乱する。これを多重散乱と言う。

このように水中を伝搬した光は、減衰、散乱、及び、反射の影響を受け、被写体に当たった光は、一部が反射しその他は表面で散乱して信号成分となって撮像装置に返ってくる。撮像装置に返ってくる光には、そのほかに被写体以外の部分からの反射光、浮遊粒子からの散乱光の雑音成分が含まれている。

信号成分の光と雑音成分の光は分離することが不可能であり、視認の限界は信号成分と雑音成分との比(S/N

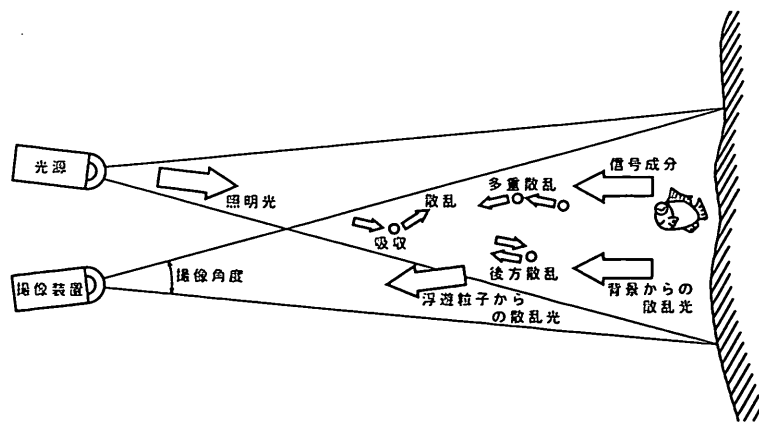
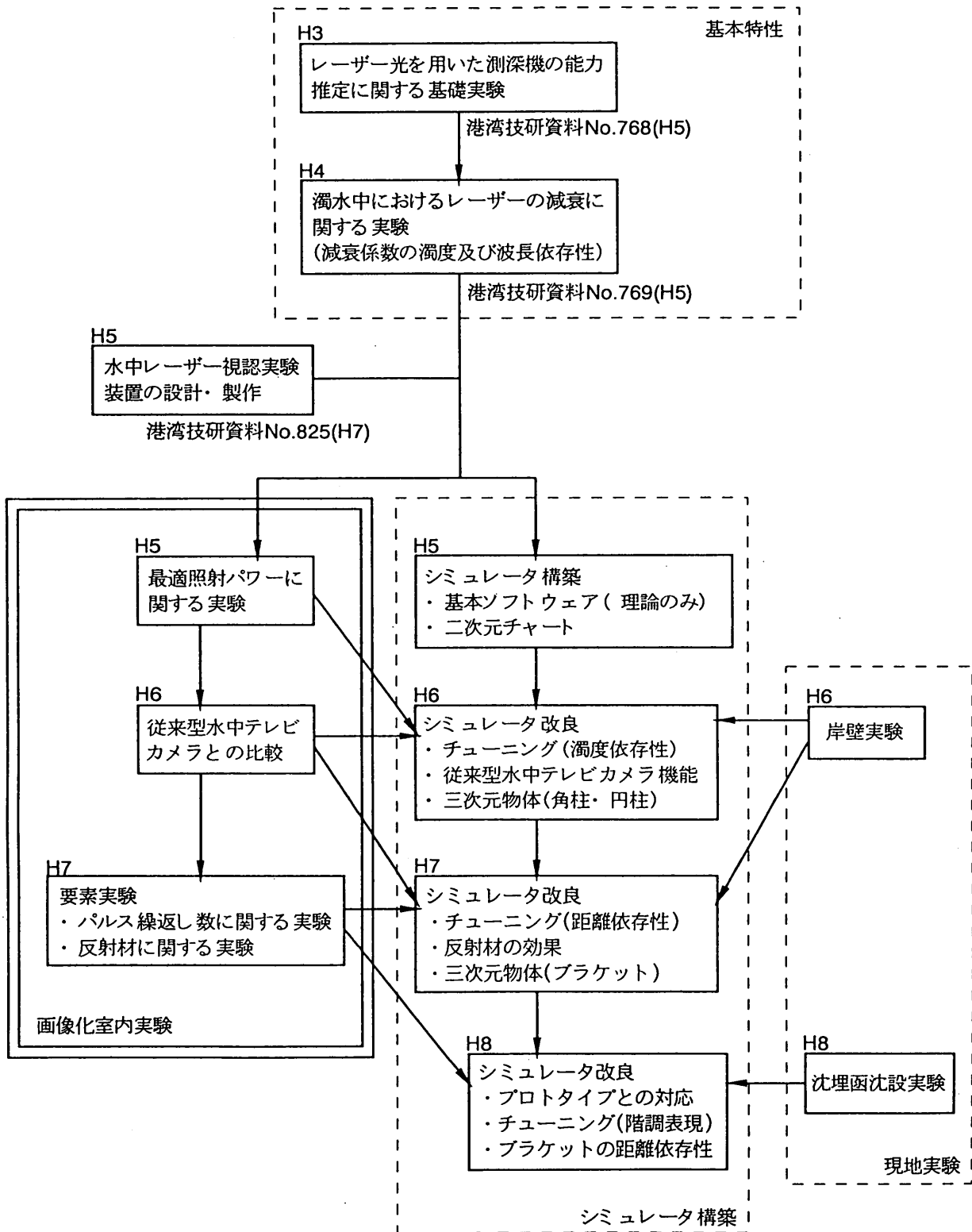


図-1 水中での光の伝搬

表-2 全体計画





比)で決定される。このため雑音成分である浮遊粒子による散乱光と被写体以外の部分からの反射光を少なくすることが水中での光技術のもっとも重要な点となる。

## 2. 2 レンジゲート方式と波長可変<sup>24-28)</sup>

2. 1で述べたように水中での視認性を良くするためには散乱光と被写体以外の部分からの反射光を少なくする必要がある。特に濁水中で視認を行う場合は散乱光の除去が重要である。

従来方式の水中テレビカメラでは光源に連続光を用いているため、光源から被写体までの間の全領域で発生した散乱光が全てカメラに入射する。視認性を向上させるにはカメラに入射する散乱光を減少させなければならない。このためにいくつかの方法が考えられているが、本研究ではレンジゲート方式を採用することにした。

図-2にレンジゲート方式の原理図を示す。レンジゲート方式は時間的に照明光と反射光の重なり部分を減少させる方法である。光源として連続光ではなくパルス光を使用し、これに超高速シャッター付き撮像装置を組み合わせる。被写体にパルス光を照射し、被写体から反射したパルス光が撮像装置に入射する瞬間だけシャッターを開けるため、パルス光がカメラに入射する時間以外の散乱光は排除される。

ある距離(レンジ)から来る光に対してだけシャッター(ゲート)が開閉されるので、これをレンジゲート方式と呼ぶ。連続光の場合に比べて大幅に散乱光が排除されるので高S/N比で視認が可能である。

さらに、今までに当所で行ったレーザー光の水中透過実験で濁水中における減衰係数には波長依存性があるこ

とが明らかになっている<sup>3-5)</sup>のでOPO(Optical Parametric Oscillator)を用いて波長可変とした。これにより濁水の濁度と粒径に対して最適な照射波長が選択できる。

本研究は、以上の考えに基づき平成5年度に設計・製作した水中レーザー視認実験装置<sup>6)</sup>を用いて行った。

## 2. 3 実験装置

水中レーザー視認実験装置は、照明光源に超短パルスレーザーを使用し、これに超高速シャッターを内蔵した撮像装置を組み合わせたレンジゲート方式の視認装置である。装置全体は、レーザー発振装置、レーザー照射装置、撮像装置、及び、画像表示装置から構成される。レーザー発振器からパルスレーザーを出力し、光ファイバーで水中の照射装置に導き、照射装置内のレンズ系で拡大して、濁水中の被写体に照射する。被写体からの反射光は撮像装置で取り込み、イメージインテンシファイアで増幅してSITカメラに送り、必要に応じて画像処理を行った後、ディスプレイ上で画像化している。水中レーザー視認実験装置の全体構成を図-3、仕様を表-1に示す。なお、当然のことではあるが単波長のレーザーを用いているため得られる画像はモノクロームである。

## 3. 画像化実験

2. で述べた水中レーザー視認実験装置で得られる画像を定量的に評価し、本装置の濁水中における基本特性を把握する目的で画像化実験を実施した。本章で述べる実験はすべて室内実験である。実験装置の配置は図-4

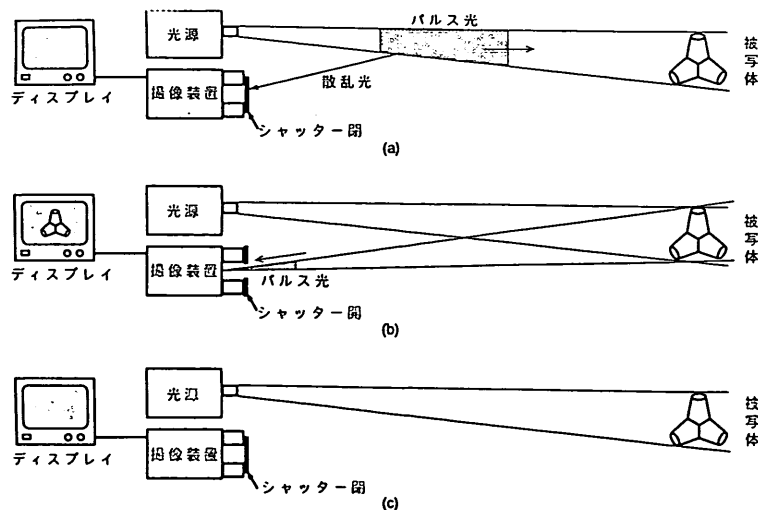


図-2 レンジゲート方式の原理図

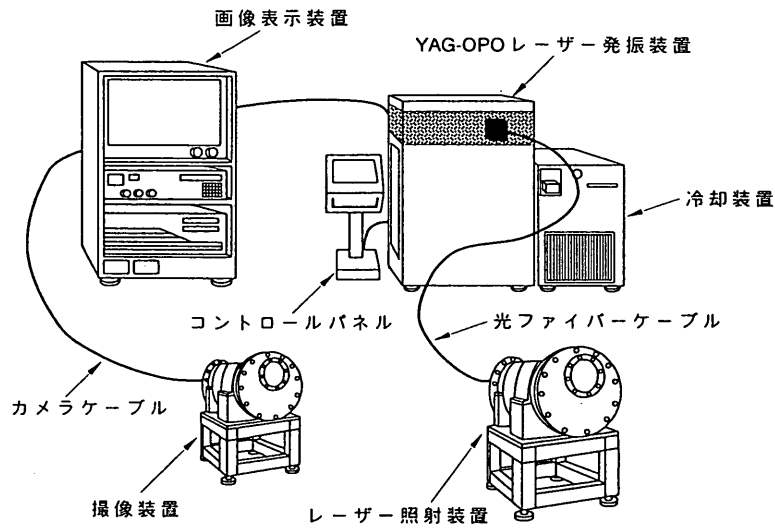


図-3 水中レーザー視認実験装置全体構成図

表-1 水中レーザー視認実験装置仕様

レーザー発振装置	発振方式: Nd:YAG-OPOレーザー 最大出力: 10mJ/Pulse(0.5W) 発振波長: 450~680nm 繰り返し数: 50Hz以下 パルス幅: 6nsec以下
レーザー照射装置	照射光学系: 距離3mの位置でφ1m、及び 距離1mでφ0.5mの大きさで 照射可能なズーム光学系 光ファイバー: 長さ10m、直径1mm
撮像装置	撮像カメラ: SITカメラ シャッタ速度: 3nsec~連続可
画像表示装置	ハイビジョンモニターTV CRT: 15インチ

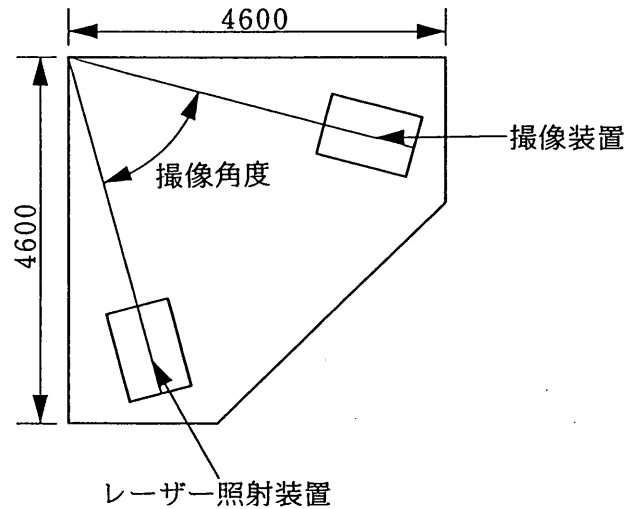


図-4 実験装置の配置の模式図

### 3. 1 最適照射パワーに関する実験

コントラストチャートによる画質の定量的評価を実施した。これは水中レーザー視認実験装置により得られる画像をコントラストチャートにより定量的に評価し、濁度・視認距離・撮像角度等に対する最適レーザー照射パワーを求めるものである。ここで撮像角度とはレーザー照射装置と撮像装置の長軸のなす角度と定義する。図-5に示すように一般的には撮像角度が大きい方が重なり部分(COMMON VOLUME)が小さくなり後方散乱が減少するので鮮明な像が得られる。

のようである。また、本章で用いている濁度(ppm)は側方散乱方式(水中の懸濁物質による散乱光を光学的に測定することによって濁度を計測する方式)を採用した米国HAC社製の濁度計を使用して測定したものである。濁度、濁質粒径によって異なるが、約3倍するとSS濃度の値となる。

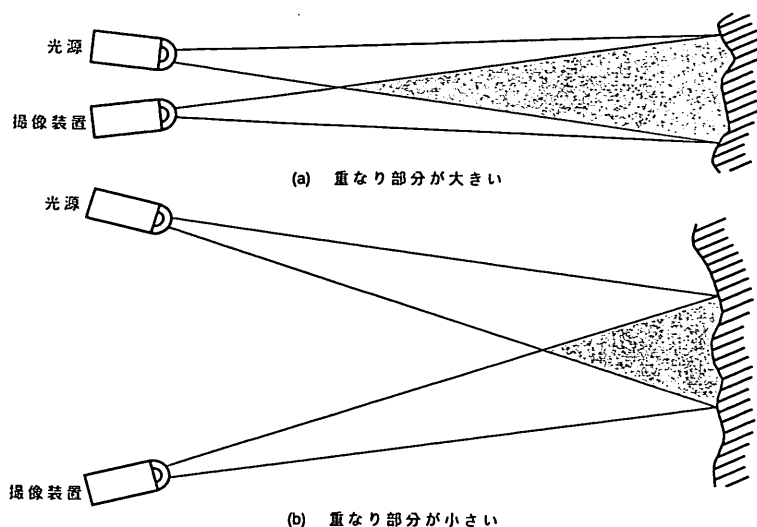


図-5 コモンボリュームの説明図

(1) 実験方法

a) 実験項目

実験は、次の項目について行った。

①濁度に対する最適レーザー照射パワーの検討

撮像角度、視認距離を一定とし濁度を順次変化させて、レーザー照射パワーに対するコントラスト値の変化を計測し、濁度とレーザー照射パワーに対するコントラスト値を検討する。

②視認距離に対する最適レーザー照射パワーの検討

撮像角度、濁度を一定とし視認距離を順次変化させ、レーザー照射パワーに対するコントラスト値の変化を計測し、視認距離とレーザー照射パワーに対するコントラスト値を検討する。

③撮像角度に対する最適レーザー照射パワーの検討

撮像角度を変化させ、撮像角度に対する最適照射パワーを検討する。

b) 濁度について

濁度の測定には前述したように側方散乱方式の濁度計を使用したためSS濃度とは異なる。以下の実験すべて同様である。

c) 実験条件

- ①視認距離：1.5～3.5m（原則として0.5mごと）
- ②撮像角度：90°、75°、60°、45°、30°
- ③濁度：0.7（清水）、1.0、1.3、1.5、1.7(ppm)  
懸濁物質はワイオミングベントナイト
- ④レーザー照射パワー：10、5、2.5、1.25、0.375(mJ)
- ⑤イメージインテンシファイア・ゲイン：  
0、2、4、6、8、10

⑥その他：

レーザー照射装置については、光学系を固定としたためコントラストチャート上でのレーザースポット径は視認距離に比例して変化した。

撮像装置については、絞りは開放、ズームは望遠側で固定、フォーカスは随時調整した。

画像表示装置については、コントラスト調整等の画像処理はすべて固定とした。

d) 実験手順

- ①装置を所定の視認距離、撮像角度、濁度に設定してレーザー照射パワー変更実験を実施する。
- ②次に撮像角度を変更して、レーザー照射パワー変更実験を実施する。
- ③次に視認距離を変更してレーザー照射パワー変更実験、撮像角度変更実験を実施する。
- ④同一濁度での一連の実験完了後、濁度を変更して次のケースを行う。

e) コントラスト計測方法

本実験で使用する白黒ストライプのコントラストチャートの模式図を図-6に示す。このコントラストチャートにより白黒パターン輝度値Iを計測し、計測値を次式に代入して、コントラスト値Cを算出する。

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

本実験では、図-6に示すとおり視認画像上の任意の座標4点を規定して、枠内中央付近の隣り合う2本の白黒パターンの中心部線上（線a-b、線c-d）での輝度分布の平均値から輝度値：I<sub>max</sub>とI<sub>min</sub>を計測した。また、

実験時のレーザー照射位置は、白黒パターンの境界線中央付近とした。

(2) 実験結果

a) 最適レーザー照射パワーの検討

視認距離、及び、濁度を固定し、撮像角度を30°、45°、60°、75°、90° に変化させた場合のコントラスト値の平均値の高いものを、その条件下での最適レーザー照射パワーとした。図-7~20及び写真-1~4に各条件下での結果と得られた画像、表-3にその結果をまとめたものを示す。その結果、おおむね、近距離、低濁度では

2.5ないし5mJ、遠距離、高濁度では5ないし10mJが最適レーザー照射パワーと考えられる。

b) コントラスト値に対する視認距離の影響の検討

濁水中では顕著なコントラスト値の距離依存性が認められる。図-21、写真-5に示すように1.0ppm、30°の条件においては視認距離の増大にともない、明確にコントラスト値が低下することが観察された。

ただし、高い濁度においては長い視認距離での有効なデータは得られなかった。

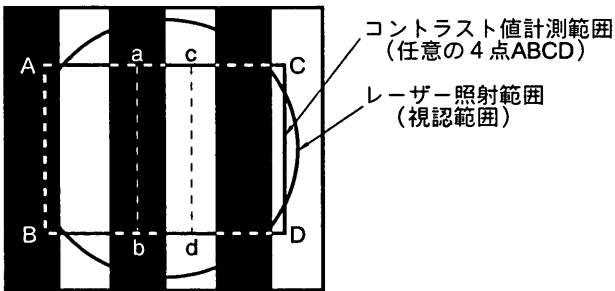


図-6 コントラストチャート模式図

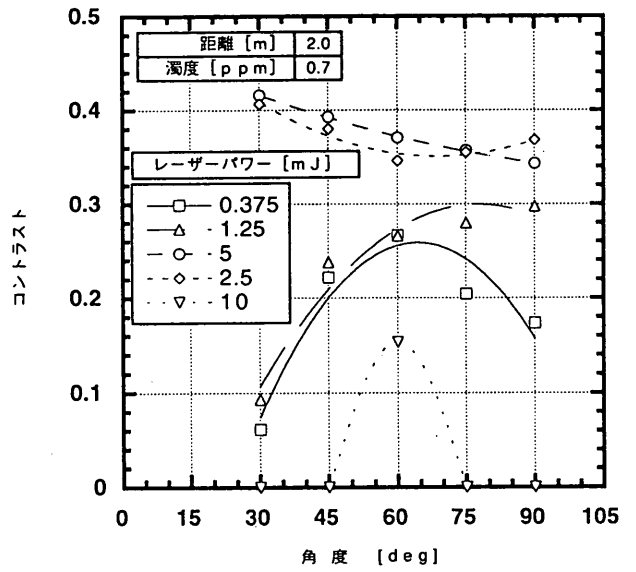


図-8 最適レーザーパワーの検討

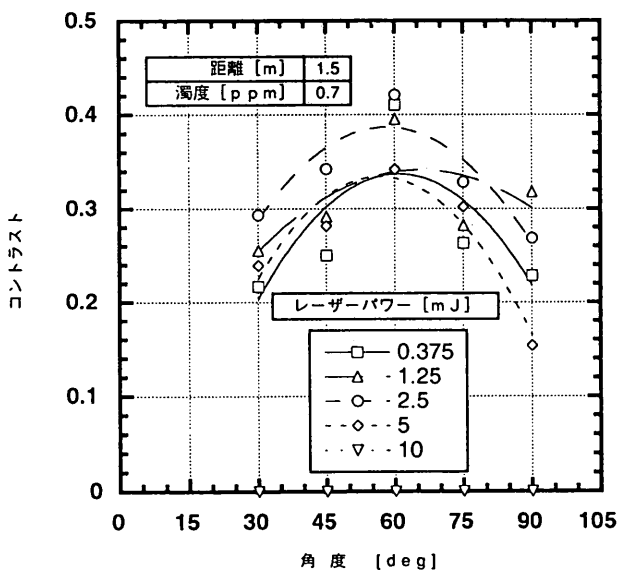


図-7 最適レーザーパワーの検討

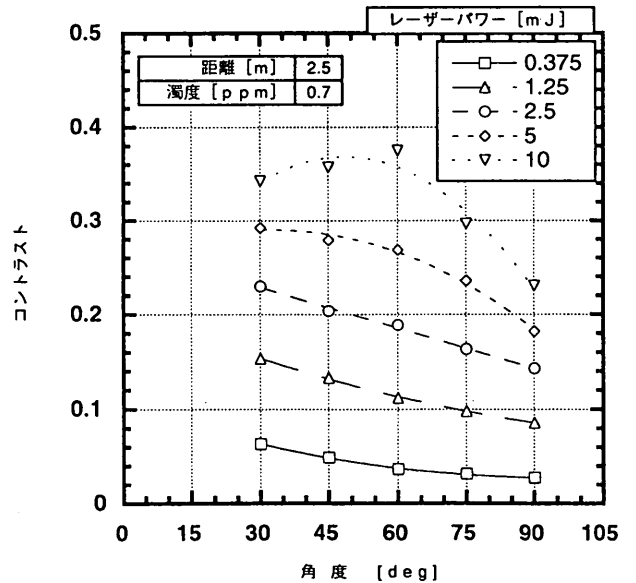


図-9 最適レーザーパワーの検討

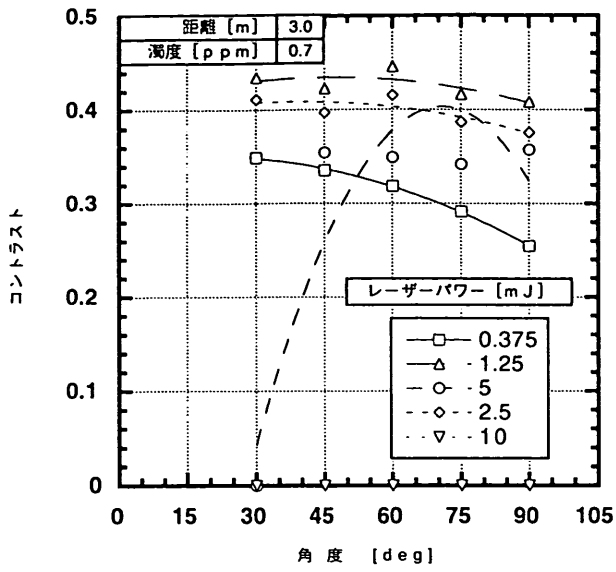


図-10 最適レーザーパワーの検討

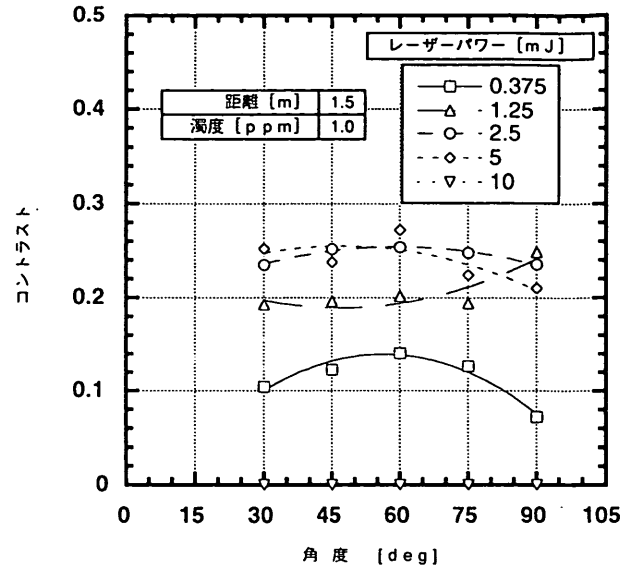


図-12 最適レーザーパワーの検討

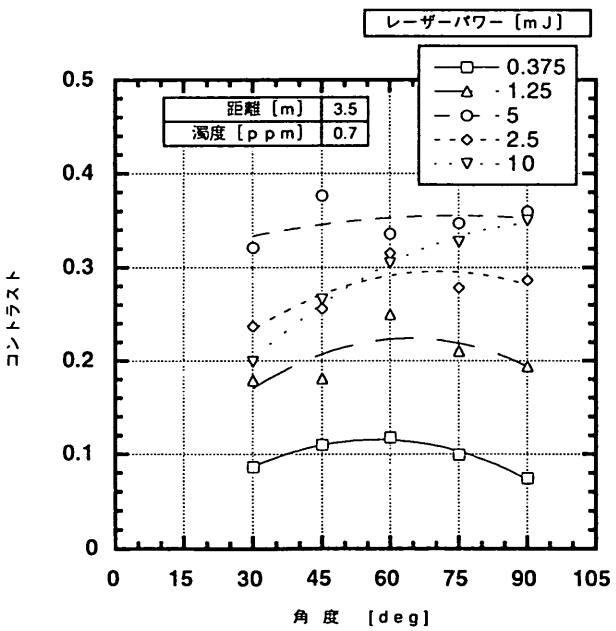


図-11 最適レーザーパワーの検討

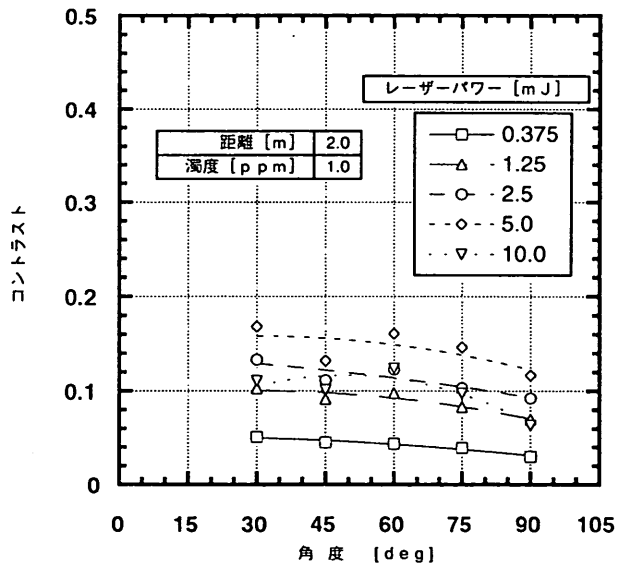


図-13 最適レーザーパワーの検討

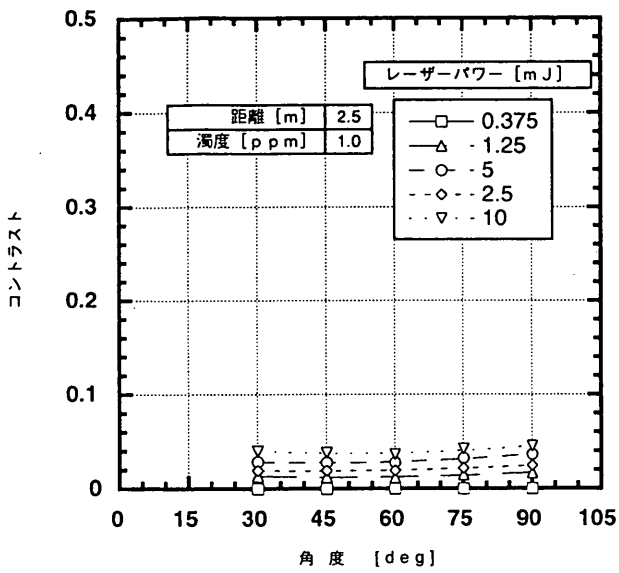


図-14 最適レーザーパワーの検討

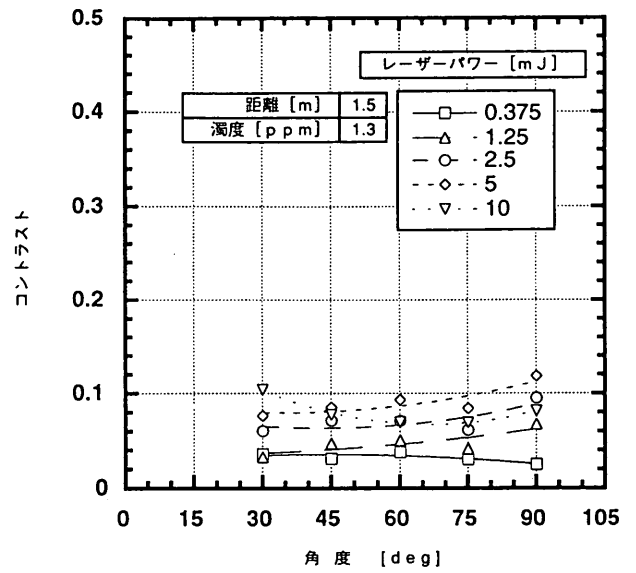


図-16 最適レーザーパワーの検討

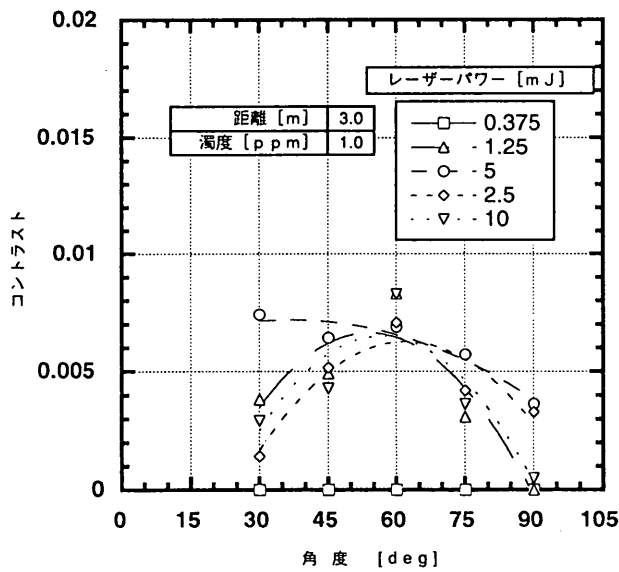


図-15 最適レーザーパワーの検討

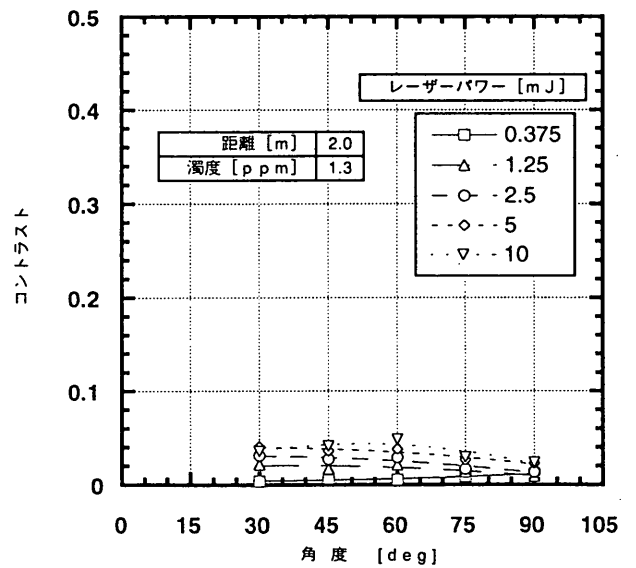


図-17 最適レーザーパワーの検討

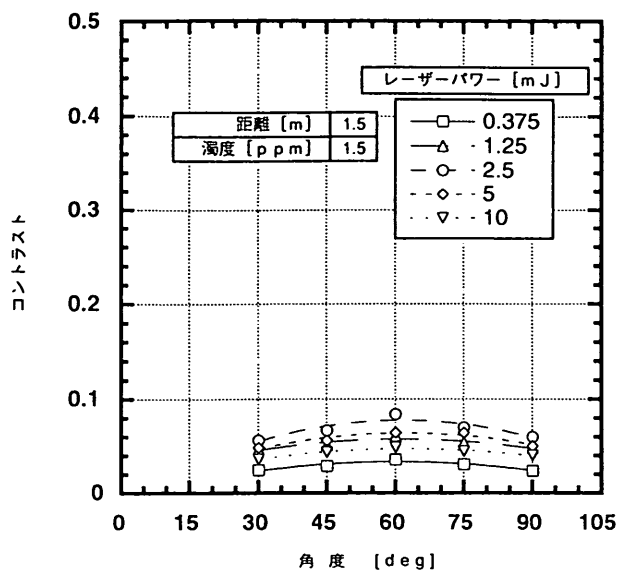


図-18 最適レーザーパワーの検討

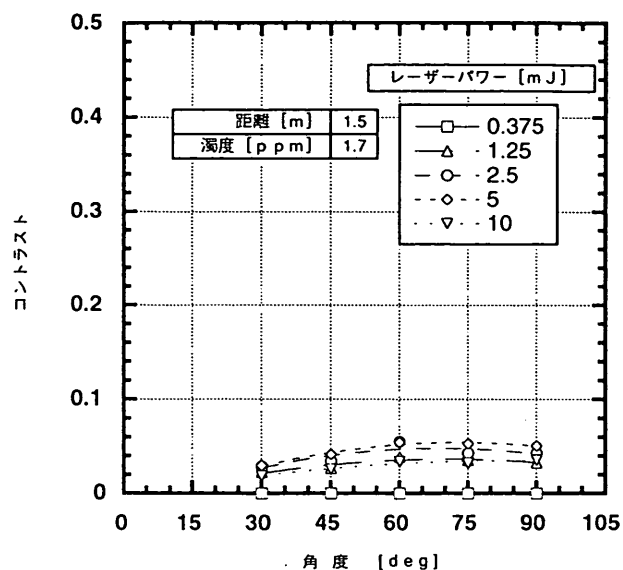


図-20 最適レーザーパワーの検討

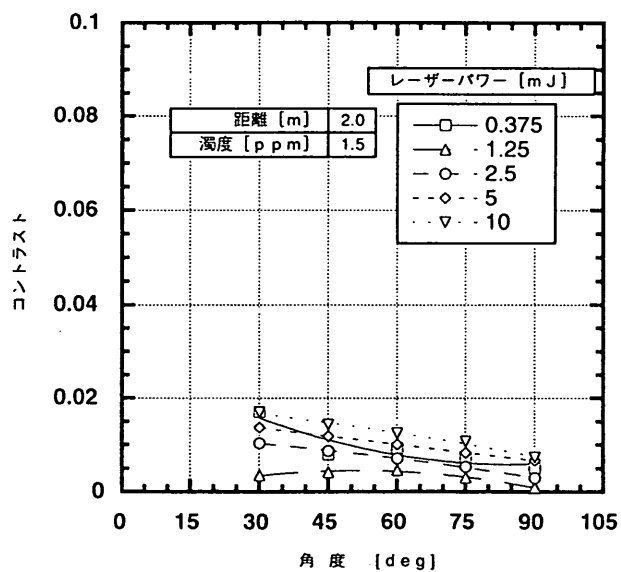


図-19 最適レーザーパワーの検討

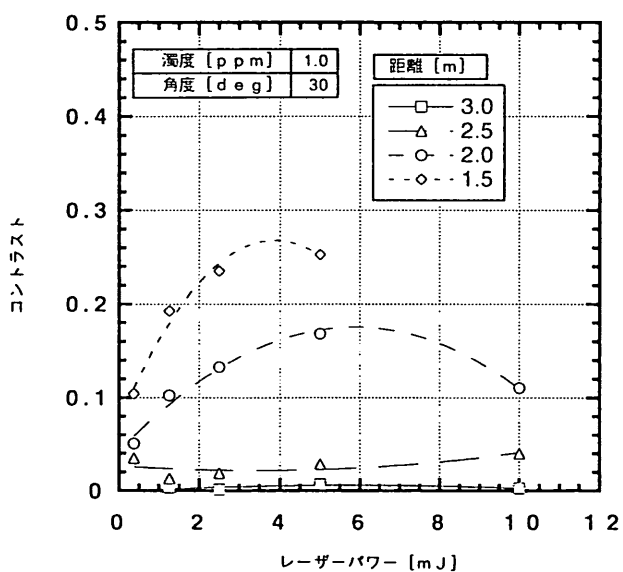
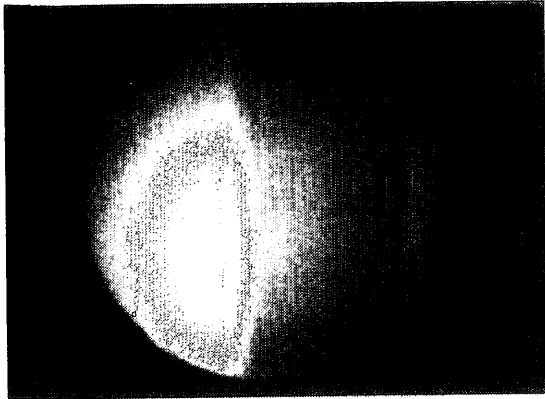


図-21 コントラスト値に対する距離の影響

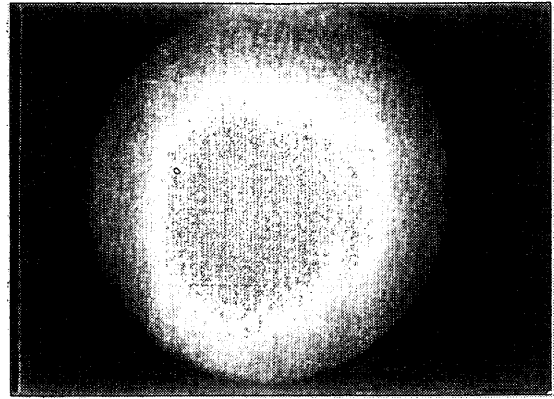
表-3 レーザーパワー最適値

距離 \ 濁度	1.5(m)	2.0(m)	2.5(m)	3.0(m)	3.5(m)
0.7(ppm)	2.5(mJ)	5(mJ)	10(mJ)	1.25(mJ)	5(mJ)
1.0(ppm)	5(mJ)	5(mJ)	10(mJ)	5(mJ)	
1.3(ppm)	5(mJ)	10(mJ)			
1.5(ppm)	2.5(mJ)	10(mJ)			
1.7(ppm)	5(mJ)				

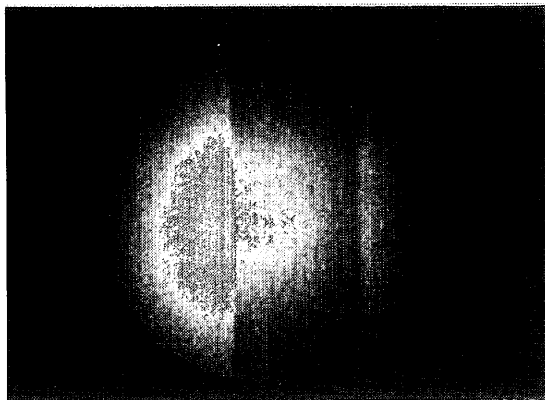
濁度：1.0ppm 撮像角度：30° レーザーパワー：5mJ



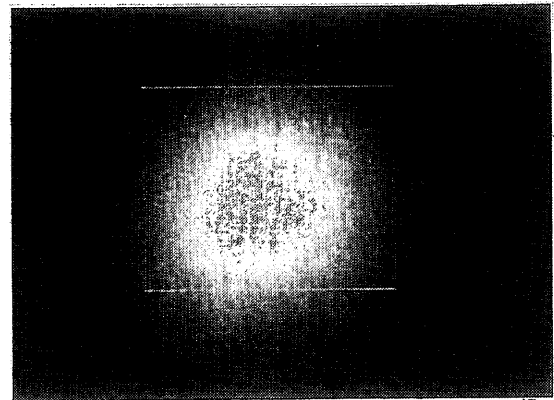
視認距離：1.5m



視認距離：2.5m



視認距離：2.0m

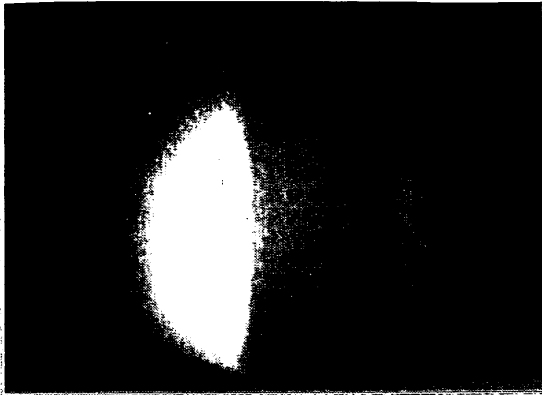


視認距離：3.0m

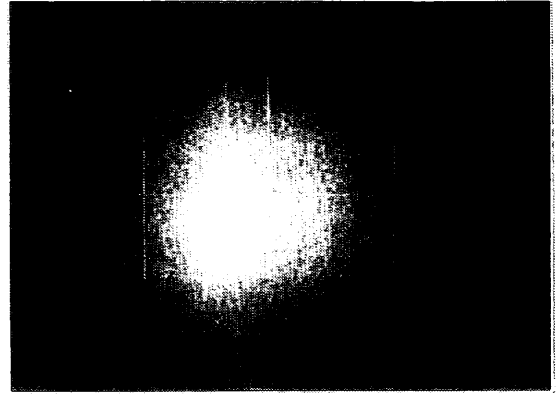
写真-1 距離変更に対するチャートの視認変化



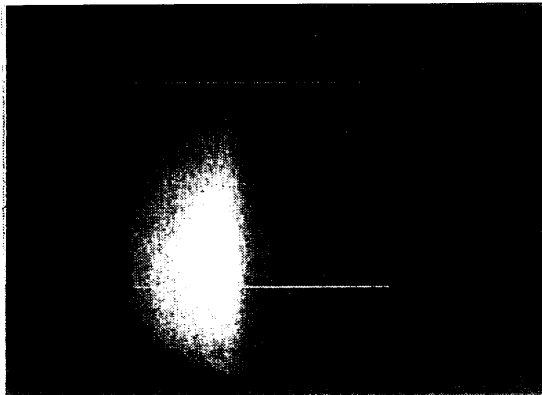
視認距離：1.5m 撮像角度：30° レーザーパワー：2.5mJ



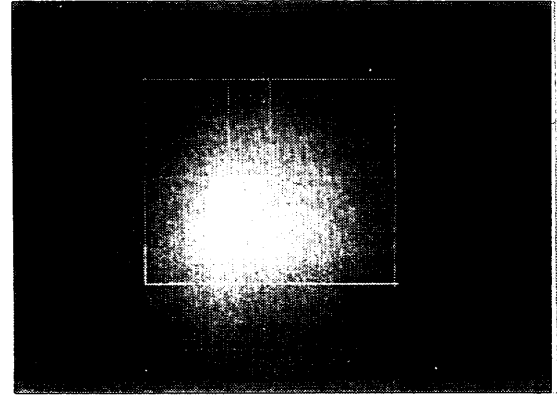
濁度：0.7ppm



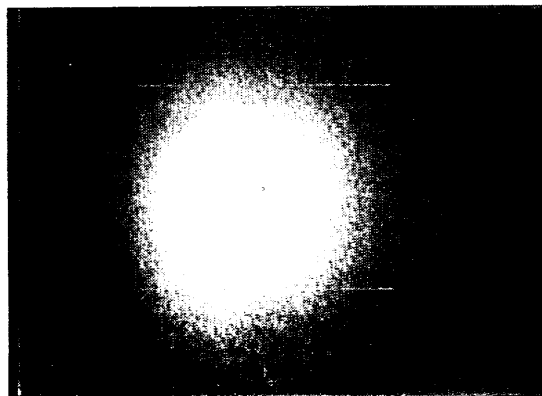
濁度：1.5ppm



濁度：1.0ppm



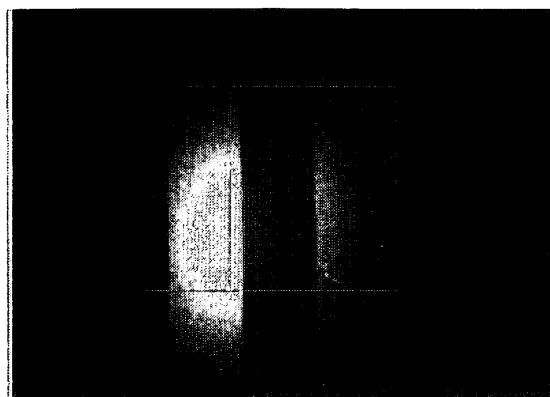
濁度：1.7ppm



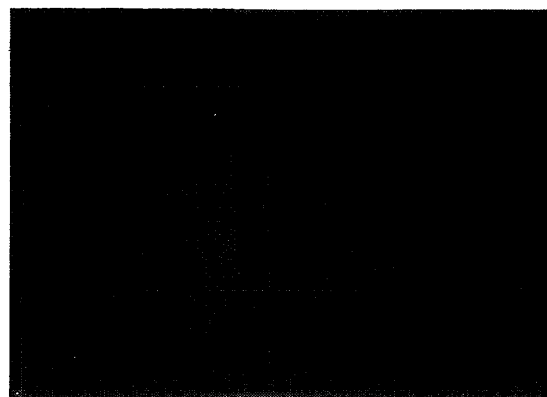
濁度：1.3ppm

写真-2 濁度変化に対するチャートの視認変化

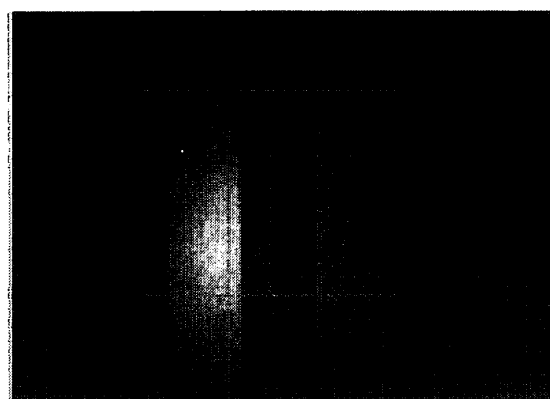
視認距離：2.5m 濁度：0.7ppm 撮像角度：60°



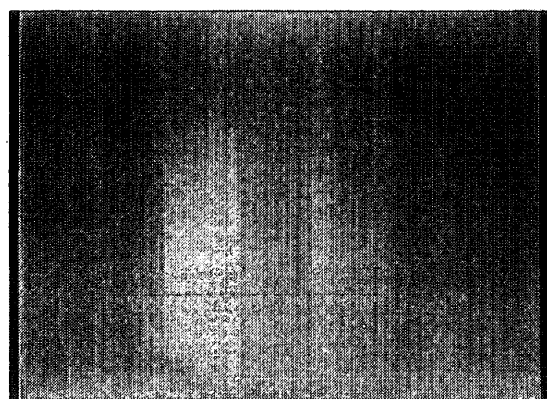
レーザーパワー：10mJ



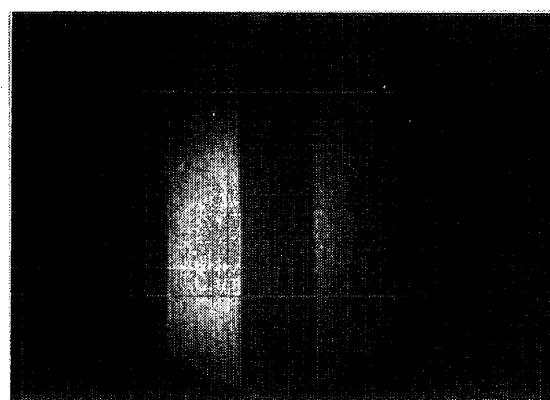
レーザーパワー：1.25mJ



レーザーパワー：5mJ



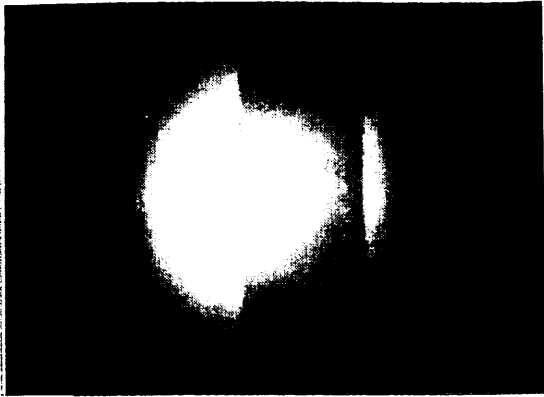
レーザーパワー：0.375mJ



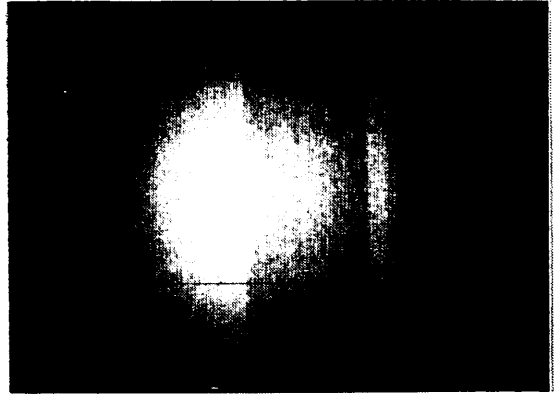
レーザーパワー：2.5mJ

写真-3 レーザーパワー変化に対するチャートの視認変化

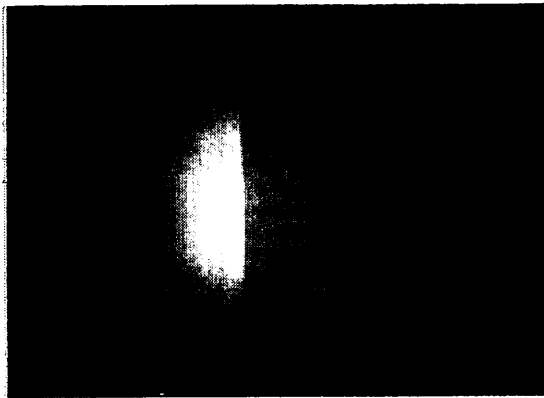
視認距離：2.0m 濁度：1.0ppm 撮像角度：60°



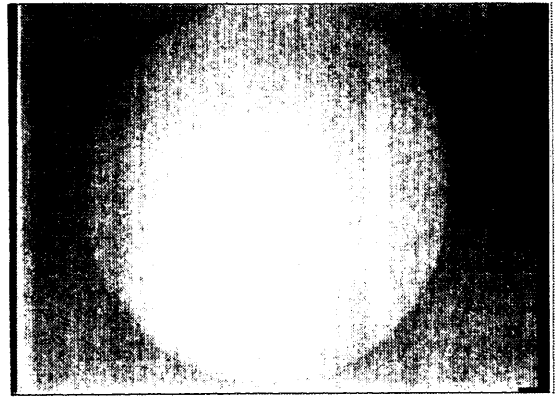
レーザーパワー：10mJ



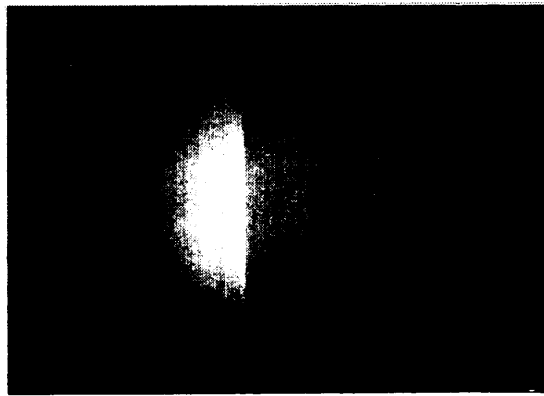
レーザーパワー：1.25mJ



レーザーパワー：5mJ



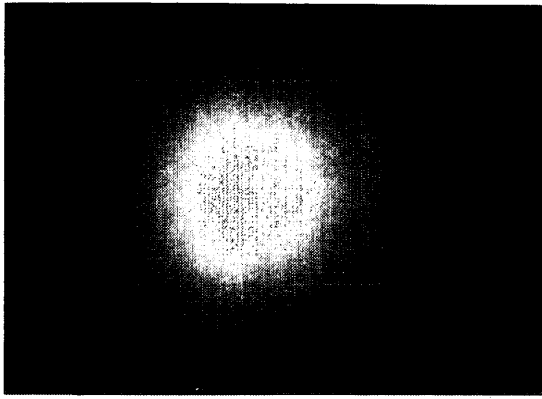
レーザーパワー：0.375mJ



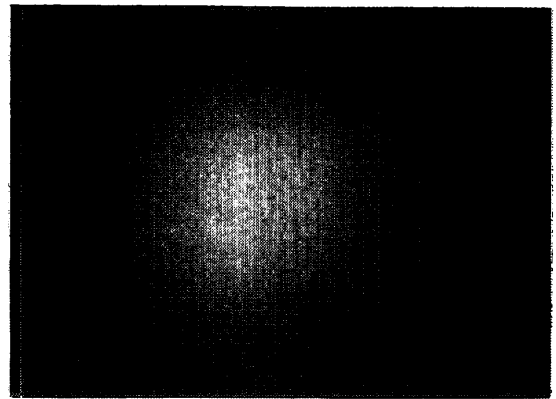
レーザーパワー：2.5mJ

写真-4 レーザーパワー変化に対するチャートの視認変化

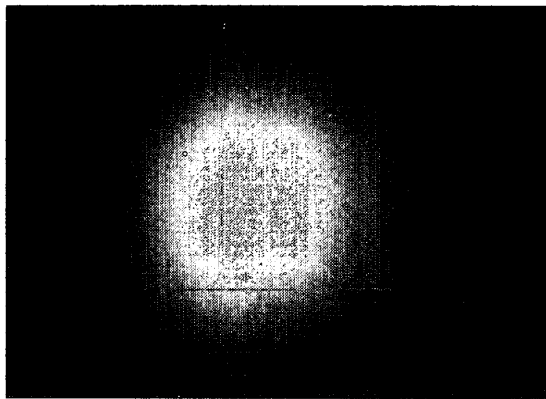
視認距離：2.0m 濁度：1.3ppm 撮像角度：60°



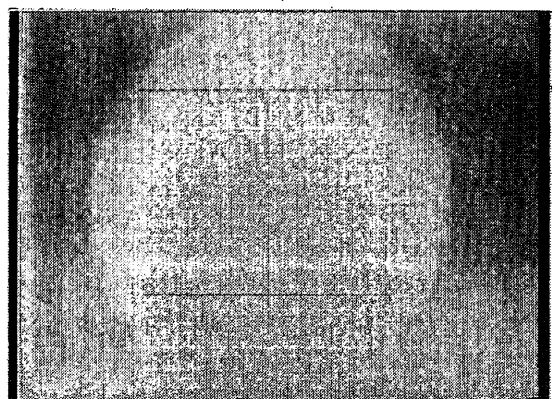
レーザーパワー：10mJ



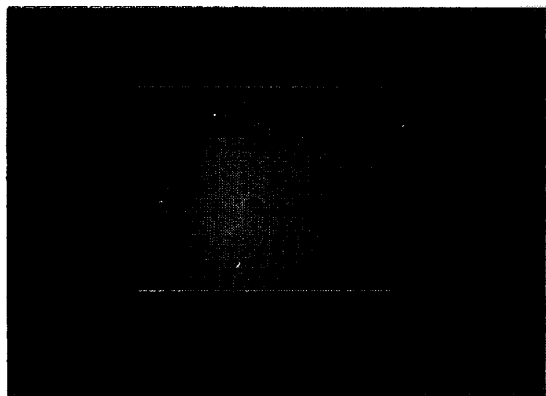
レーザーパワー：1.25mJ



レーザーパワー：5mJ



レーザーパワー：0.375mJ



レーザーパワー：2.5mJ

写真-5 レーザーパワー変化に対するチャートの視認変化

c) コントラスト値に対する濁度の影響の検討

図-22、写真-6に示すようにコントラスト値は濁度が高くなると減少する傾向が認められる。濁度1.9ppmの場合ズームの広角側では肉眼で画像を確認できたが、望遠側ではピントが合わない、及び、光量不足等の理由によって画像を確認できなかったため以降の実験を中止した。

d) コントラスト値に対する撮像角度の影響の検討

写真7~10に画像を示す。一貫したコントラスト値の撮像角度依存性は認められなかった。ただし、おおむね撮像角度60°でのコントラスト値が高く、30°、45°、75°、90°ではほぼ同程度であった。しかし、写真上で画

像が肉眼で確認できるものについては、肉眼で見るかぎり90°が最もよく見えるようである。

e) コントラスト値に対するイメージンスフィア・ゲインの影響の検討

図-23に示すようにある程度の距離、濁度まではイメージンスフィア・ゲインを高めることによって、コントラストの改善が可能である。しかし、長距離、高濁度ではノイズが強すぎるため、ノイズの増幅も行ってしまったためか、ほとんど変化がなかった。

e) コントラスト値に対する波長の影響の検討

図-24に示すようにレーザー波長を変更したときのコントラスト値は、長波長側で最も高くなる。

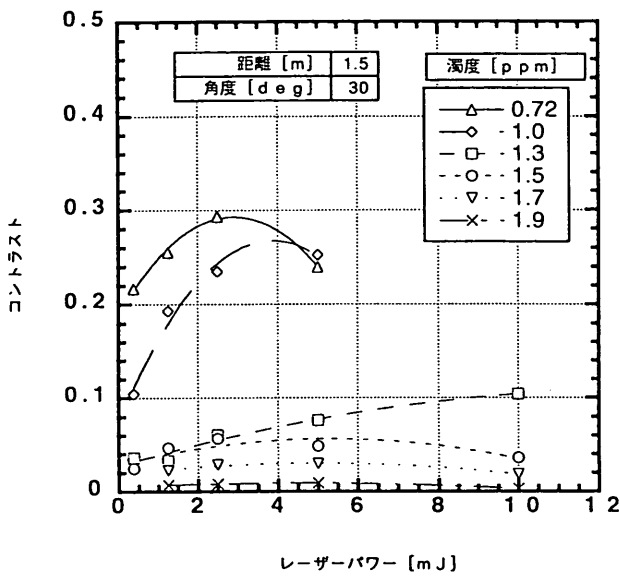


図-22 コントラスト値に対する濁度の影響

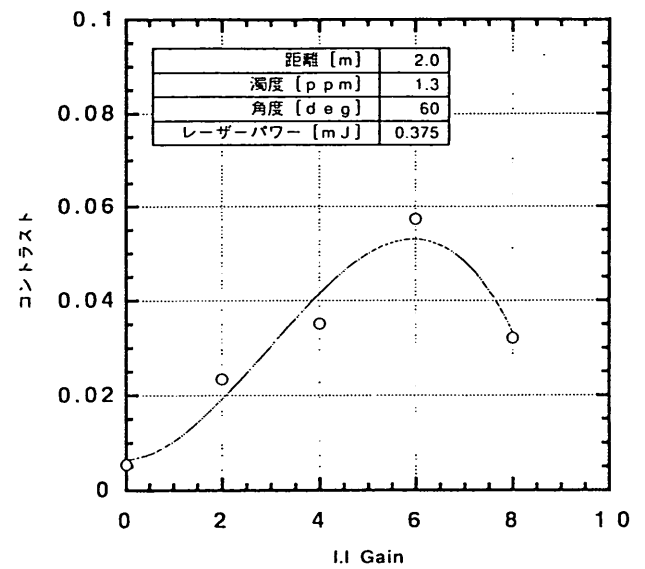
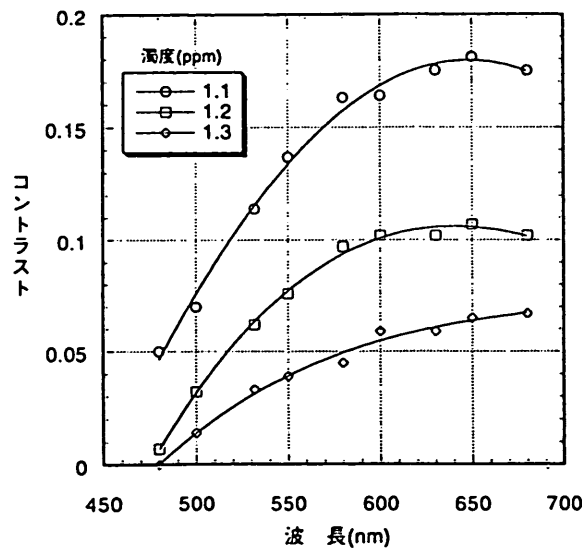


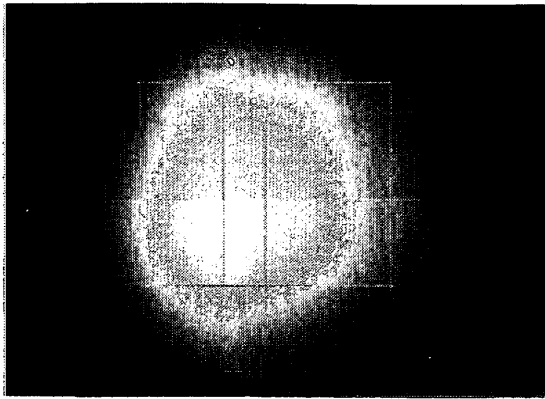
図-23 コントラスト値に対するI Iゲインの影響



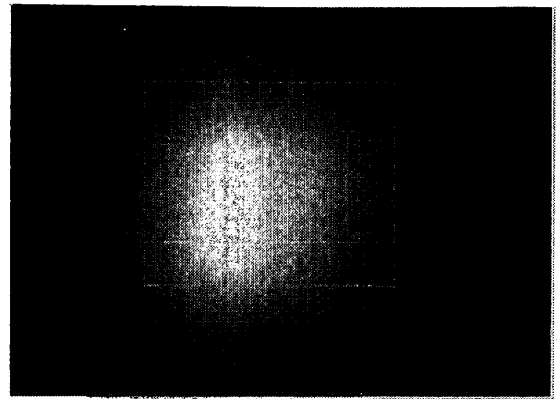
レーザー出力：約3 (mJ)  
距離：3 (m)  
撮像角度：60°

図-24 コントラスト値の波長依存性

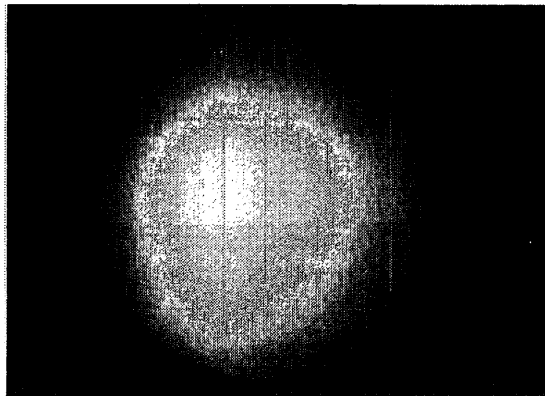
視認距離：1.5m 濁度：1.5ppm 撮像角度：60°



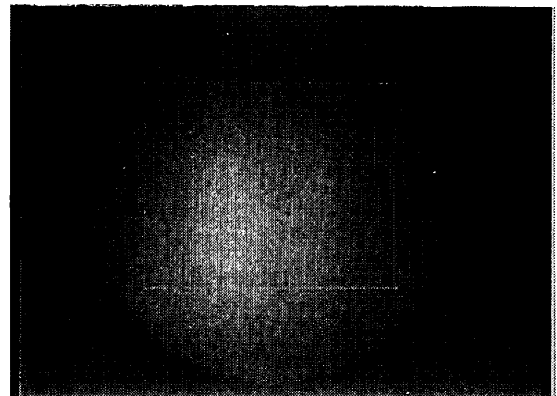
レーザーパワー：10mJ



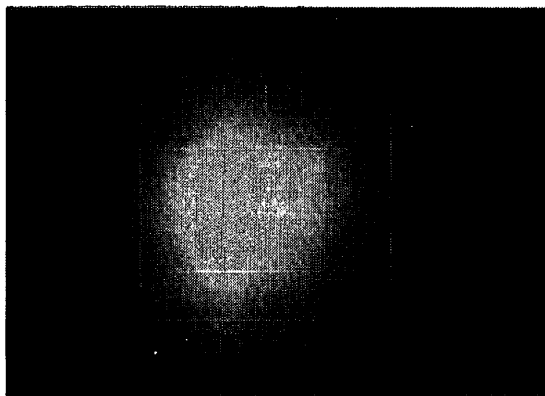
レーザーパワー：1.25mJ



レーザーパワー：5mJ



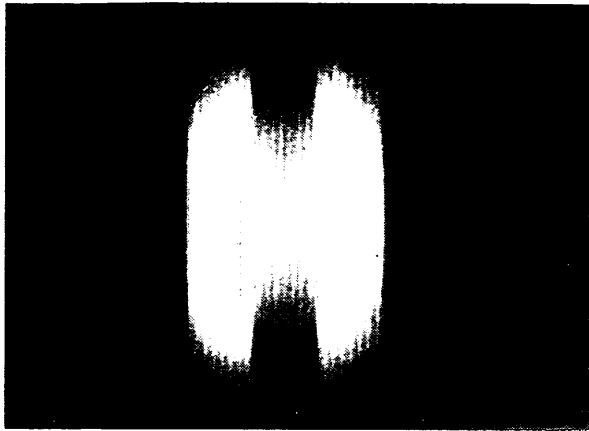
レーザーパワー：0.375mJ



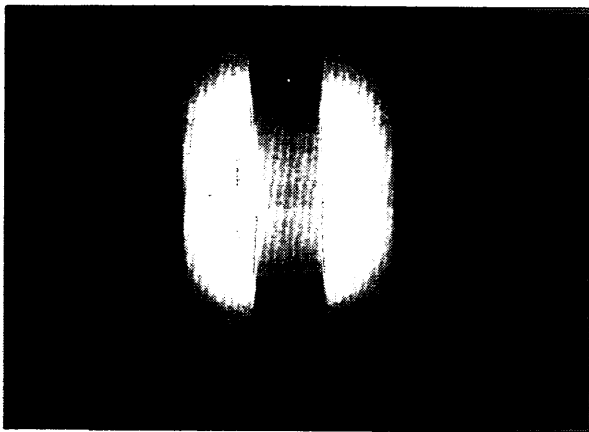
レーザーパワー：2.5mJ

写真-6 レーザーパワー変化に対するチャートの視認変化

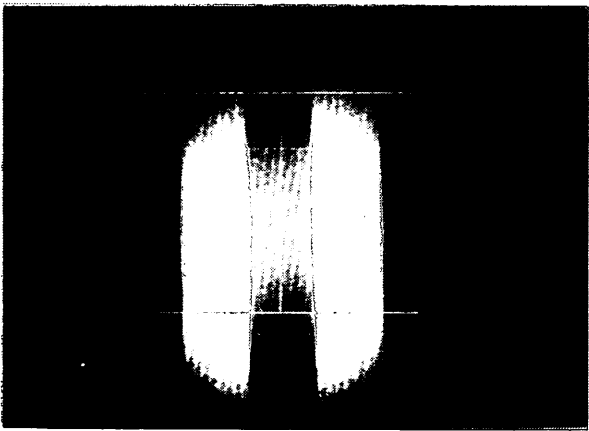
視認距離:3.5m 濁度:0.7ppm レーザーパワー:10mJ



撮像角度 : 30°



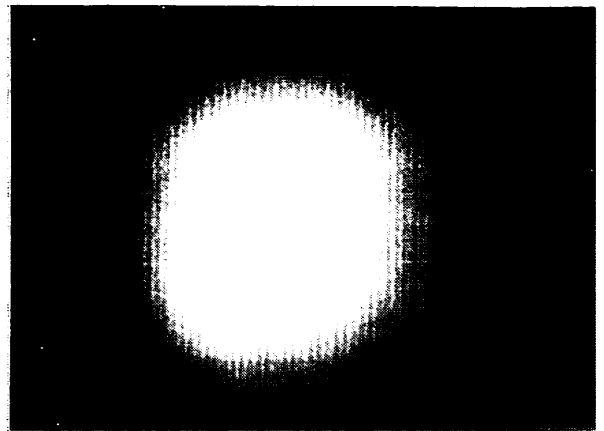
撮像角度 : 60°



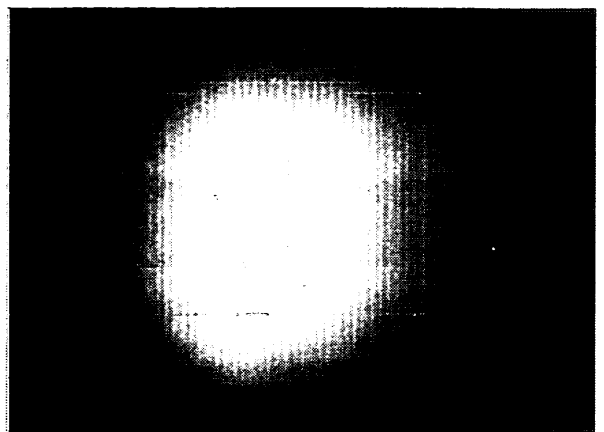
撮像角度 : 90°

写真-7 角度変化に対するチャートの視認変化

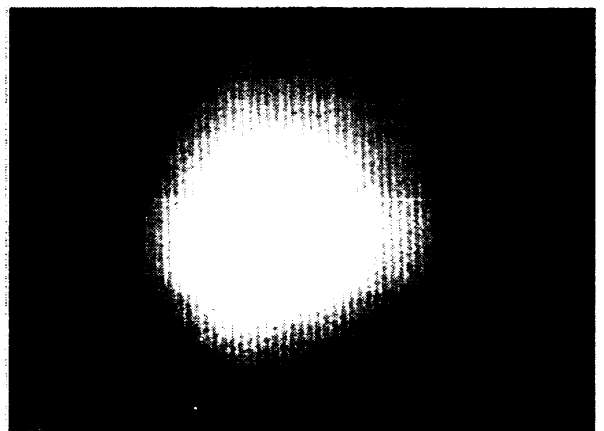
視認距離:1.5m 濁度:1.5ppm レーザーパワー:5mJ



撮像角度 : 30°



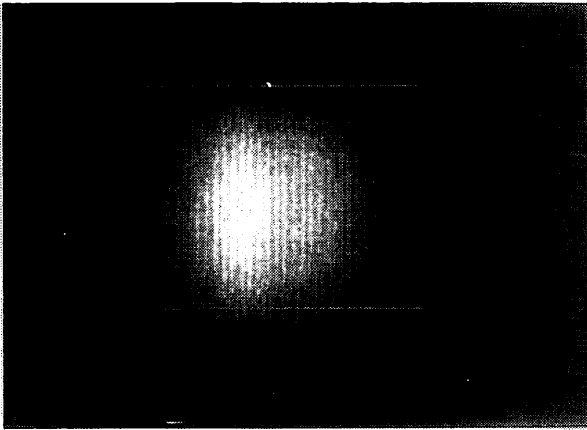
撮像角度 : 60°



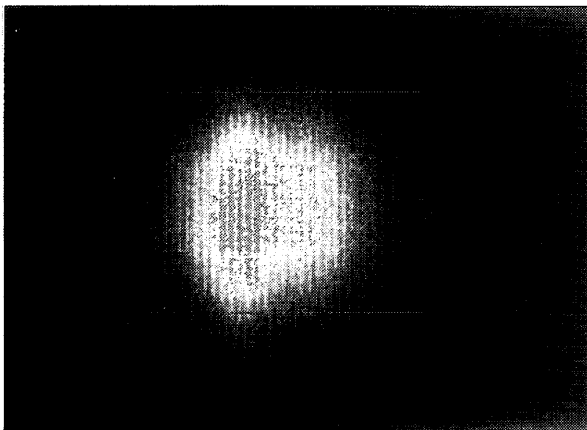
撮像角度 : 90°

写真-8 角度変化に対するチャートの視認変化

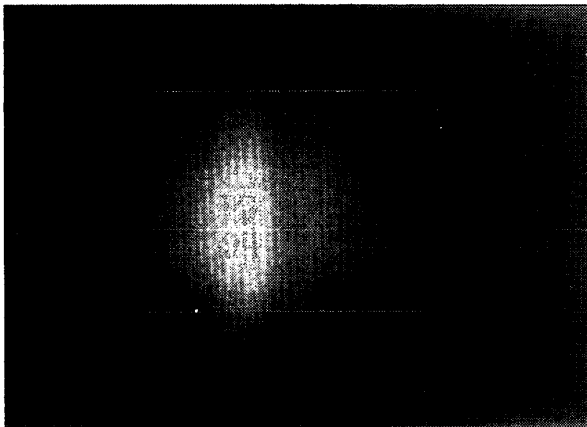
視認距離:1.5m 濁度:1.3ppm レーザーパワー:5mJ



撮像角度 : 30°



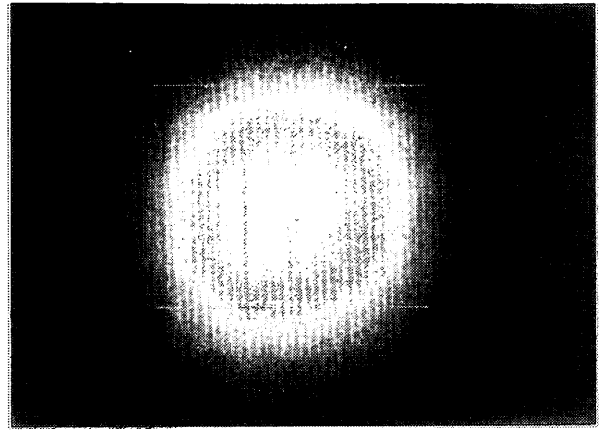
撮像角度 : 60°



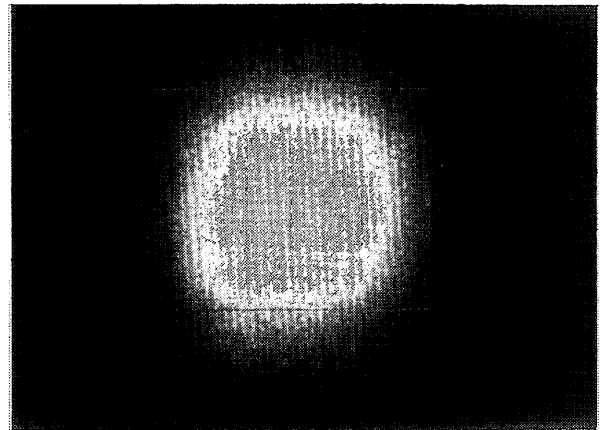
撮像角度 : 90°

写真-9 角度変化に対するチャートの視認変化

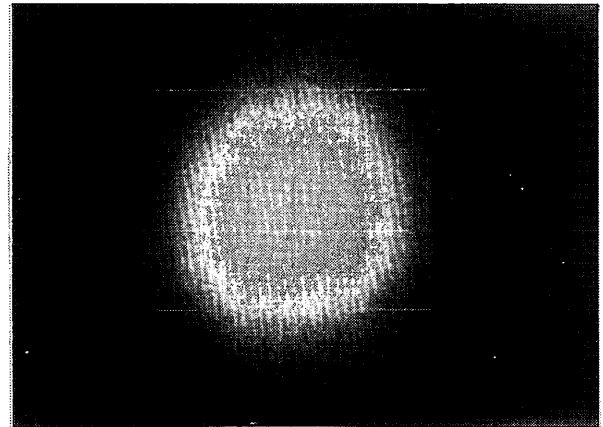
視認距離:3.0m 濁度:1.0ppm レーザーパワー:10mJ



撮像角度 : 30°



撮像角度 : 60°



撮像角度 : 90°

写真-10 角度変化に対するチャートの視認変化



### 3. 2 水中レーザー視認実験装置と従来型水中テレビカメラの比較実験

水中レーザー視認実験装置で得られる画像と従来型水中テレビカメラで得られる画像の定量的評価を実施した。これは水中レーザー視認システムの視認性能が従来型水中テレビカメラより優れていることを実証するためである。

#### (1) 実験方法

##### a) 実験内容

水中レーザー視認実験装置と従来型水中テレビカメラの使用環境による特性を検討するため、種々の条件下で3. 1と同様に白黒ストライプのコントラストチャートを視認対象として得られる画像のコントラスト値を算出し、視認装置の違いによる画質の違いを定量的に評価する。

##### b) 実験装置

実験装置の配置等は3. 1 (1) b)と同様である。従来型水中テレビカメラの主要目は次のとおりである。

- ①照明装置：ハロゲンランプ(350W単灯)
- ②撮像装置：SITカメラ、感度Min.  $10^{-4}$ Lux
- ③画像表示装置：画像処理装置、高解像度モニター搭載

##### c) 実験条件

- ①レーザー照射パワー：1、5、8(mJ)光ファイバー入射エネルギー値
- ②レーザー波長：500、550、620(nm)
- ③従来型照明照射パワー(連続光)：100、200、350(W)  
(ハロゲンランプの電圧を3通りに変更)
- ④濁度：0.5、1.2、1.8、2.5、3.2、3.9、4.6、5.3、6.0、6.7、7.4、8.1、8.8、9.5、10.9、12.3、13.7、15.1、16.5(ppm)  
懸濁物質は試験用ダスト(JIS Z 8901) 第7種(関東ローム)を用いた。これは粒径27~31 $\mu$ mでワイオミングベントナイトと比較して粒径が大きい。

⑤視認距離：1、2、3m

⑥撮像角度：60° 固定

##### d) 実験手順

- ①装置を所定の視認距離、濁度に設定して、レーザー照射パワー及びレーザー波長をパラメータとした実験を実施する。
- ②次に、視認距離を変更した後、再度レーザー照射パワー及びレーザー波長をパラメータとした実験を実施する。
- ③同一濁度での実験完了後、濁度を変更して上記①、

②の順で実験を実施する。

④水中レーザー視認実験装置と従来型水中テレビカメラとの比較実験を並行して実施する。

e) コントラスト計測方法

3. 1 (1) e) と同じ方法で行った。

(2) 実験結果

a) 視認限界濁度

水中レーザー視認実験装置及び従来型水中テレビカメラでの視認可能な最高濁度は、それぞれ視認距離1mにおいて16.5ppmと13.7ppm、視認距離2mにおいて7.4ppmと6.7ppm、視認距離3mにおいて6.0ppmと5.3ppmであった。これは懸濁物質として使用した関東ロームの粒径が3. 1で使用したワイオミングベントナイトと比較して大きいため、「粒径が大きいほど減衰係数は小さくなる」<sup>3-5)</sup>という傾向によるものと考えられる。

b) 水中レーザー視認実験装置と従来型水中テレビカメラの視認性比較

図-25~27、写真-11に実験結果を示す。水中レーザー視認実験装置本来の想定使用条件である視認距離が長く濁度が高い場合には、水中レーザー視認実験装置の方が良い視認性を有している。0.5~2ppm付近の低い濁度では従来型水中テレビカメラの方がやや良い視認性を示す場合もある。これはイメージインテンシファイアが光学系に含まれている水中レーザー視認実験装置の特性によるものである。

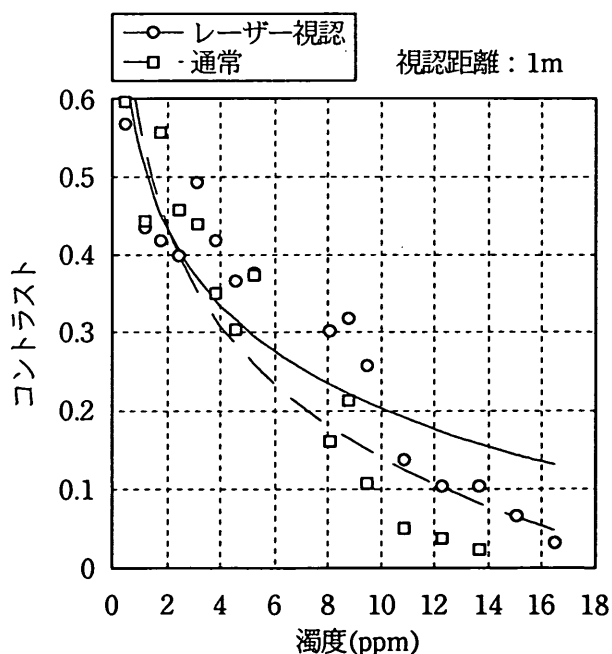
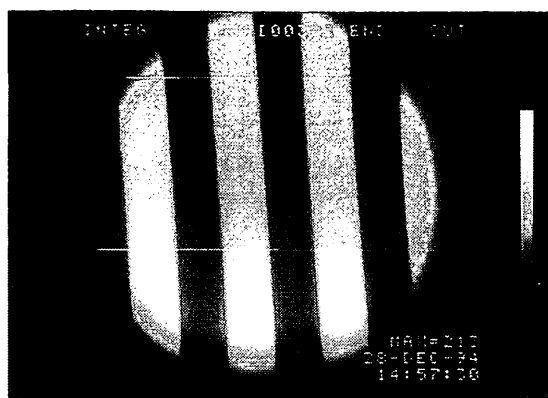
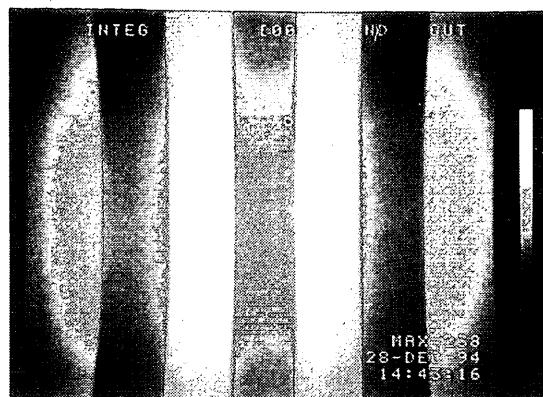


図-25 水中レーザー視認実験装置と従来型水中テレビカメラの視認性比較

濁度：1.2ppm



コントラスト：0.41  
 レーザー波長：550nm レーザー出力：4mJ  
 視認距離：3.0m

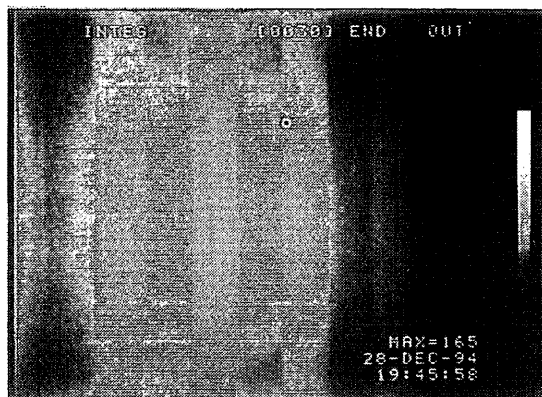


コントラスト：0.31  
 水中ライト出力：200W  
 視認距離：3.0m

濁度：2.5ppm

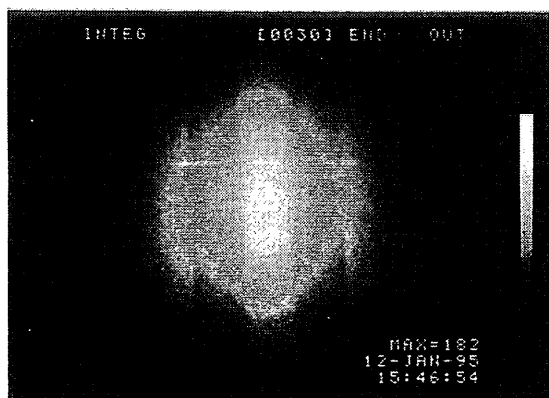


コントラスト：0.26  
 レーザー波長：550nm レーザー出力：4mJ  
 視認距離：3.0m

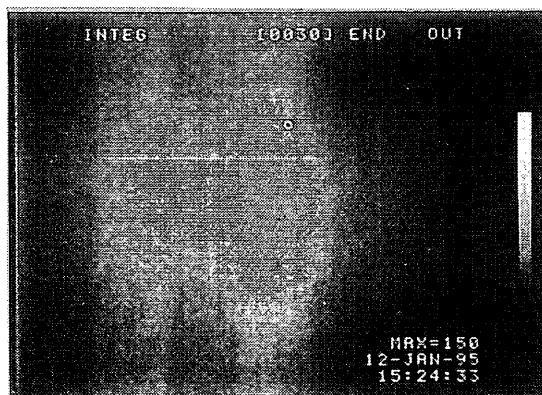


コントラスト：0.09  
 水中ライト出力：350W  
 視認距離：3.0m

濁度：3.9ppm



コントラスト：0.19  
 レーザー波長：500nm レーザー出力：1mJ  
 視認距離：3.0m



コントラスト：0.05  
 水中ライト出力：200W  
 視認距離：3.0m

水中レーザー視認装置

従来型視認装置

写真-11 水中レーザー視認実験装置と従来型水中テレビカメラの視認性比較

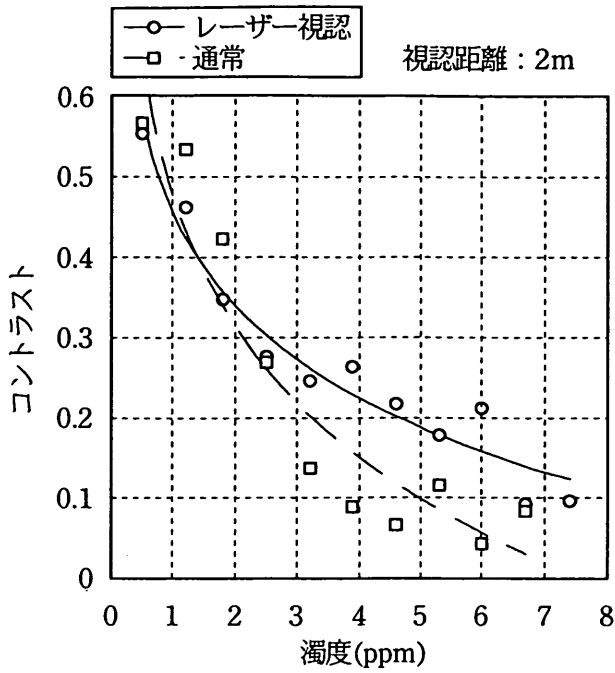


図-26 水中レーザー視認実験装置と従来型水中テレビカメラの視認性比較

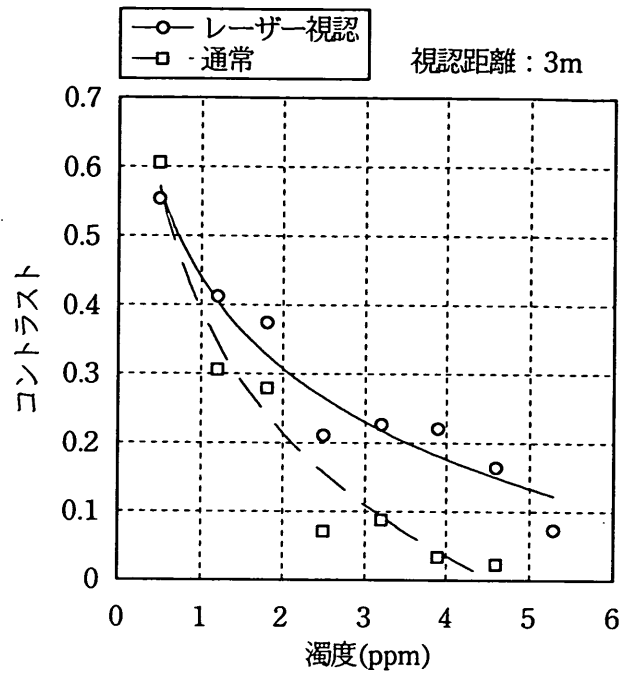


図-27 水中レーザー視認実験装置と従来型水中テレビカメラの視認性比較

c) 水中レーザー視認実験装置の視認性のレーザー照射パワーに対する依存性

図-28~30、写真-12に実験結果を示す。水中レーザー視認実験装置の視認性は、比較的短い視認距離

である1、2mで、かつ、高い濁度（視認不可となる濁度付近）の場合、レーザー照射パワーの大きい方が良いという結果が得られた。

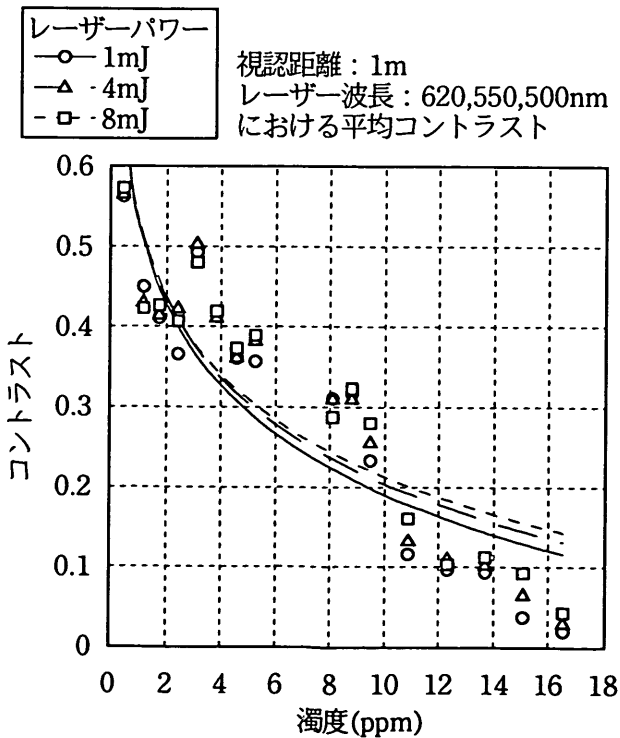


図-28 水中レーザー視認装置視認性レーザーパワー依存

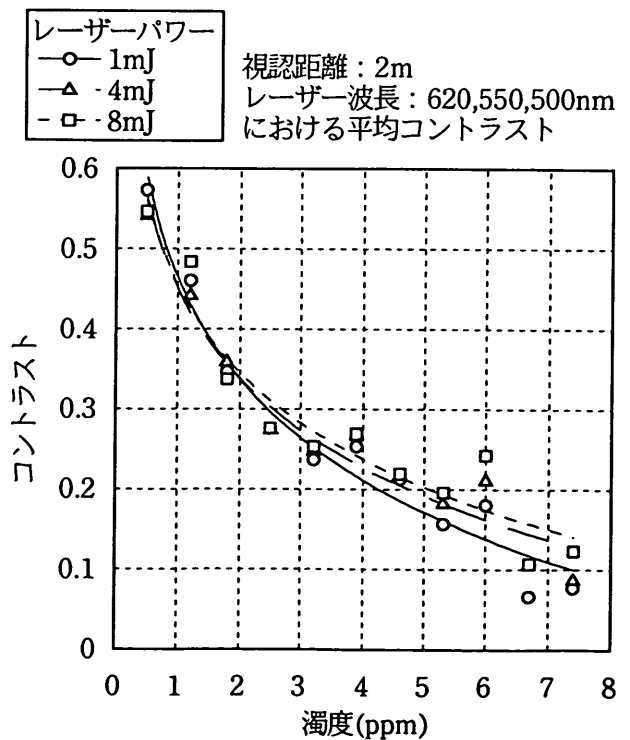
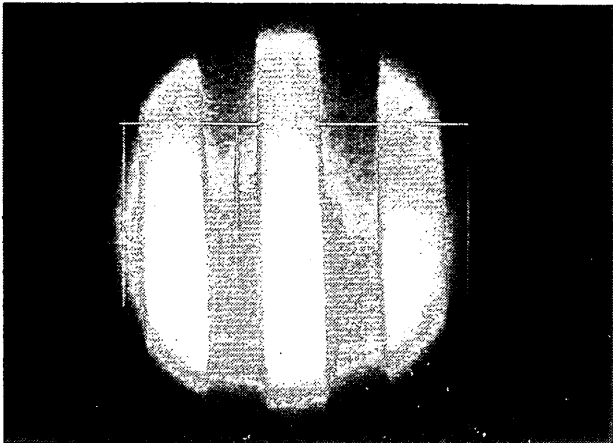
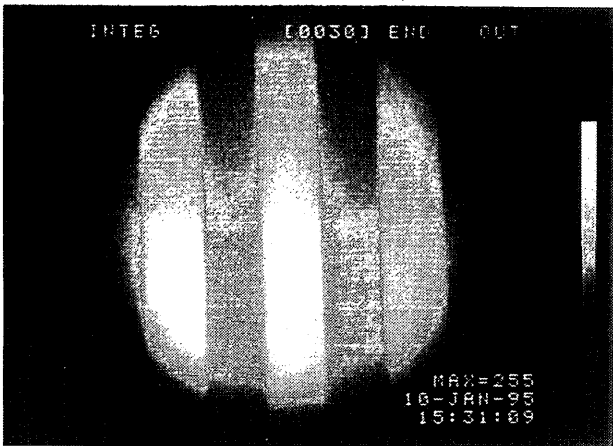


図-29 水中レーザー視認装置視認性レーザーパワー依存

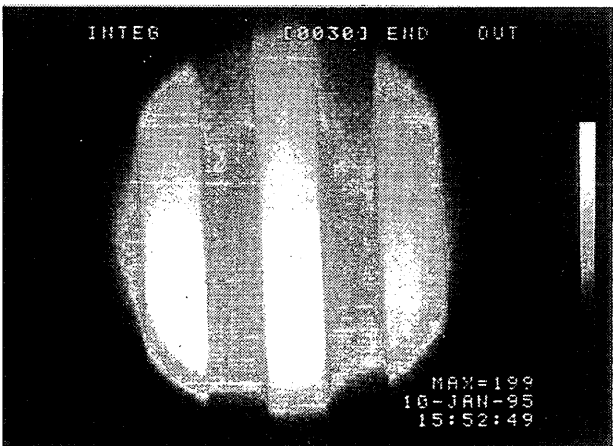
視認距離:2m 濁度:3.2ppm レーザー波長:500nm



レーザーパワー:1mJ コントラスト:0.24



レーザーパワー:4mJ コントラスト:0.25



レーザーパワー:8mJ コントラスト:0.25

写真-12 水中レーザー視認実験装置レーザーパワー依存性

レーザーパワー  
 ○ 1mJ  
 △ 4mJ  
 □ 8mJ  
 視認距離:3m  
 レーザー波長:620,550,500nm  
 における平均コントラスト

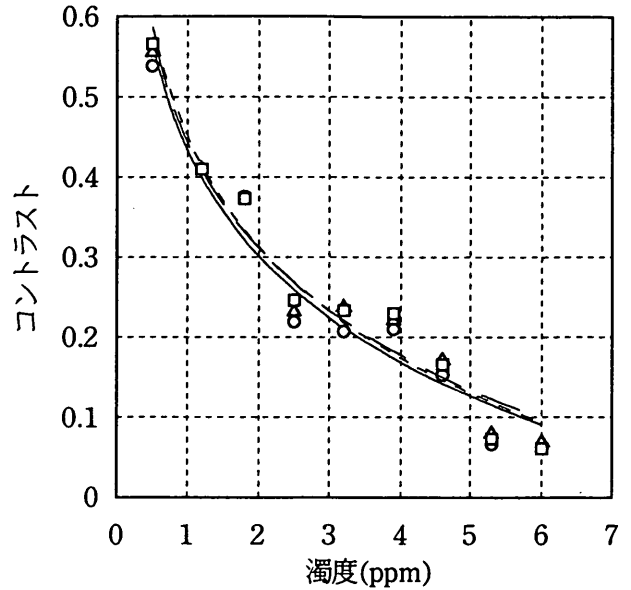


図-30 水中レーザー視認装置視認性レーザーパワー依存

d) 水中レーザー視認実験装置の視認性のレーザー波長に対する依存性

図-31~33、写真-13に実験結果を示す。水中レーザー視認実験装置の視認性は、ほぼ実験全体を通して500nmで比較的悪く、550、620nmで比較的良いという結果が得られた。しかしながら、ワイオミングベントナイトを懸濁物質として使用した実験に比べるとレーザー波長に顕著には依存していない。今回の実験で懸濁物質として使用した関東ロームの粒径が大きいことによるものと考えられる。

e) 従来型水中テレビカメラの視認性の従来型照明照射パワーに対する依存性

図-34~36、写真-14に実験結果を示す。従来型水中テレビカメラの視認性は、従来型照明照射パワーが大きいものほど良いという結果が得られた。これは従来型水中テレビカメラの場合、連続光である従来型照明の出力増加は後方散乱光の増加も招くため、視認性は必ずしも向上しないとの考え方に反する結果である。しかしこれは撮像角度が0度に近い通常の使用状態での考え方であり、今回の実験では3.1(2)d)で述べた、もっともコントラスト値の高い撮像角度である60°を採用したことにより重なり部分が小さくなり後方散乱光の

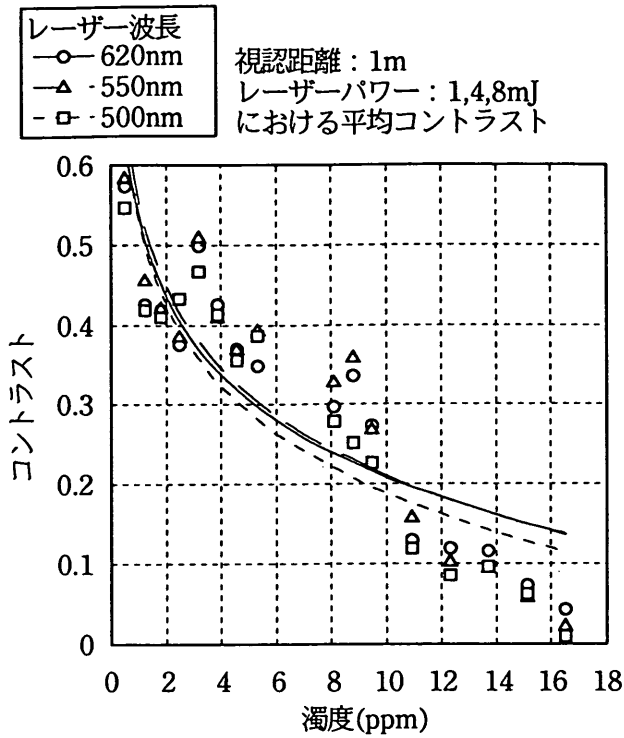


図-31 水中レーザー視認装置視認性レーザー波長依存

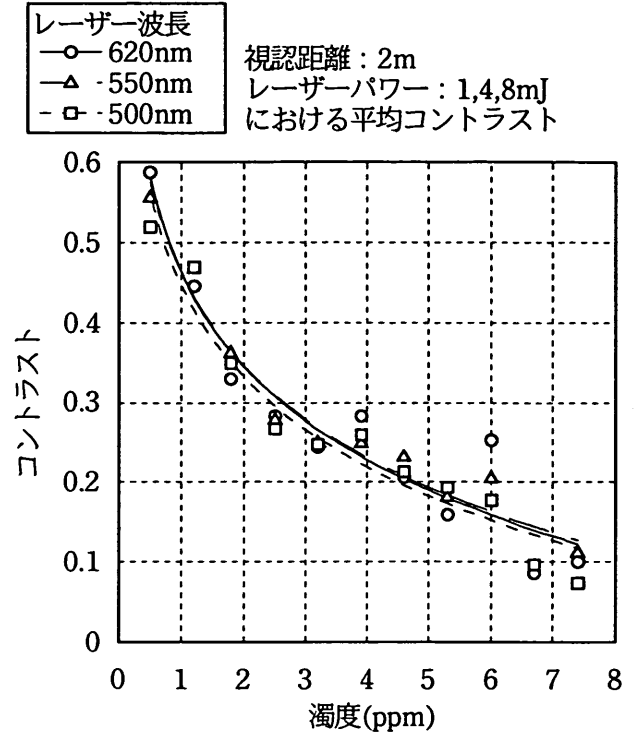


図-32 水中レーザー視認装置視認性レーザー波長依存

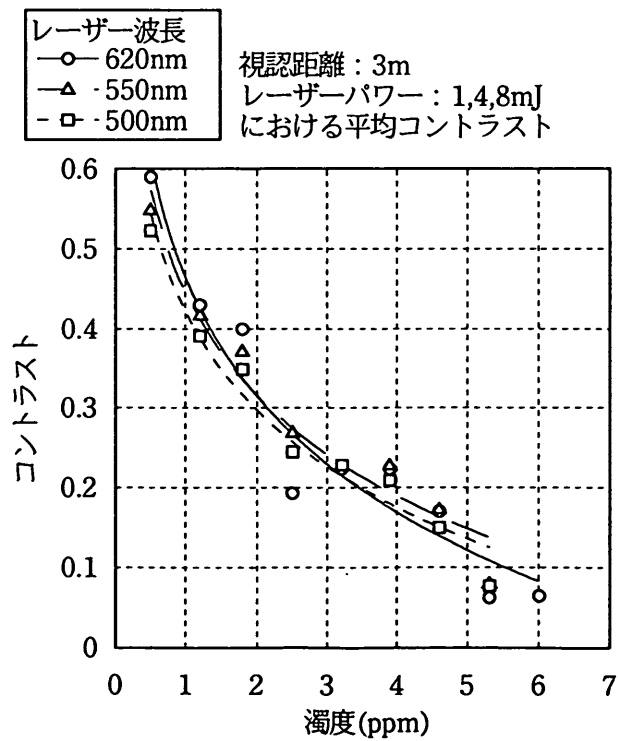


図-33 水中レーザー視認装置視認性レーザー波長依存

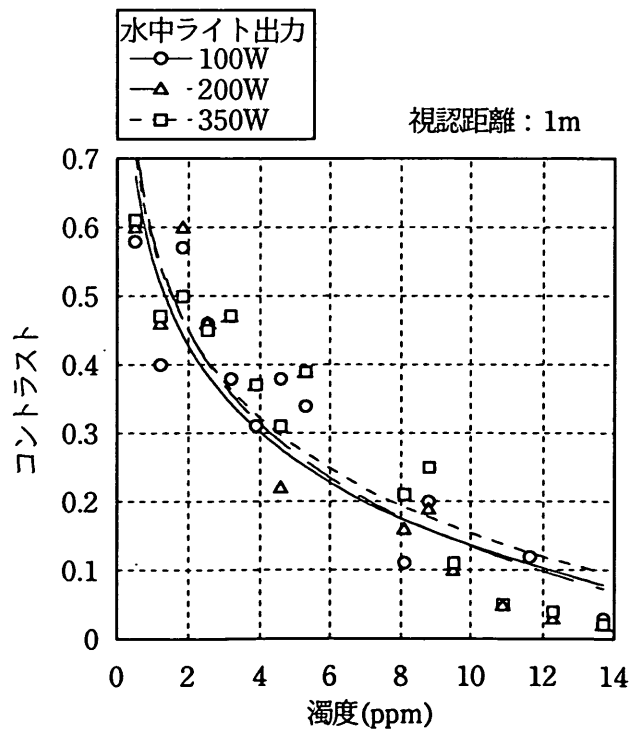
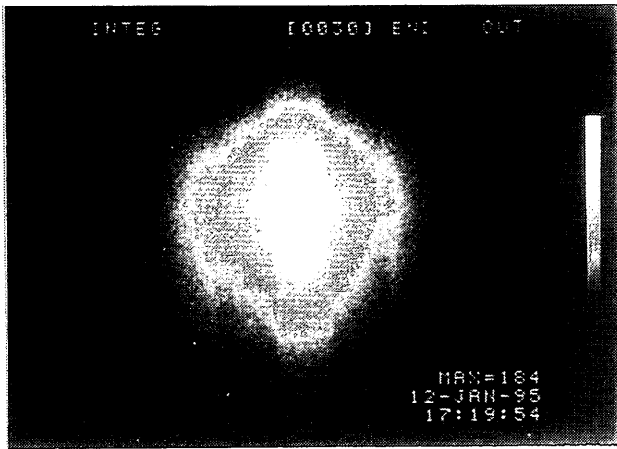
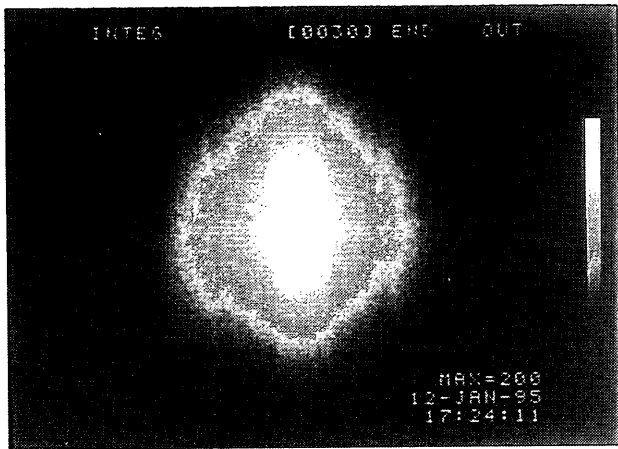


図-34 従来型カメラ視認性の水中ライト出力依存

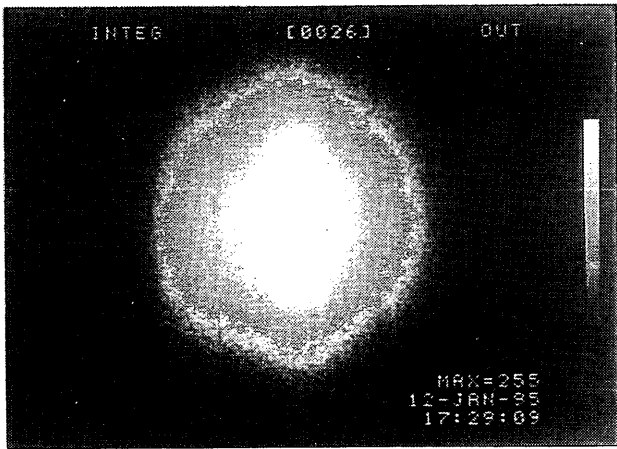
視認距離:3m 濁度:4.6ppm レーザーパワー:4mJ



レーザー波長:620nm コントラスト:0.18



レーザー波長:550nm コントラスト:0.19



レーザー波長:500nm コントラスト:0.15

写真-13 水中レーザー視認実験装置レーザー波長依存性

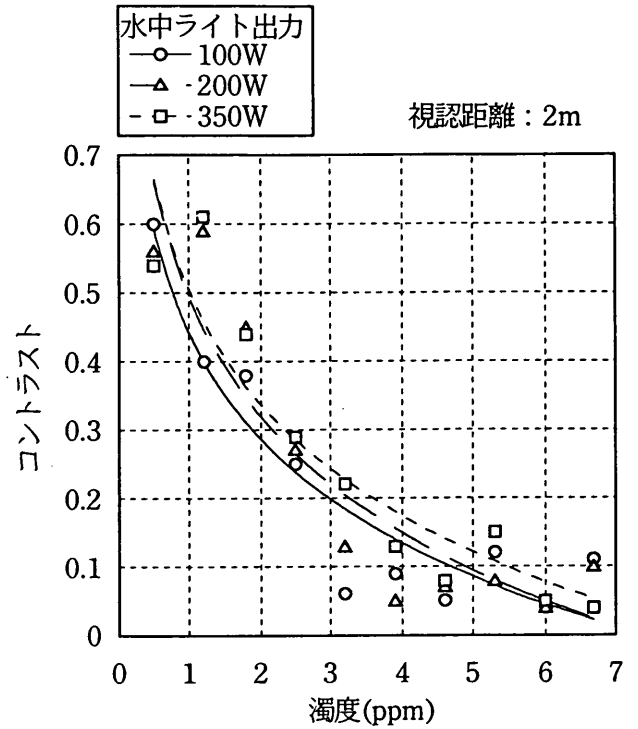


図-35 従来型カメラ視認性の水中ライト出力依存

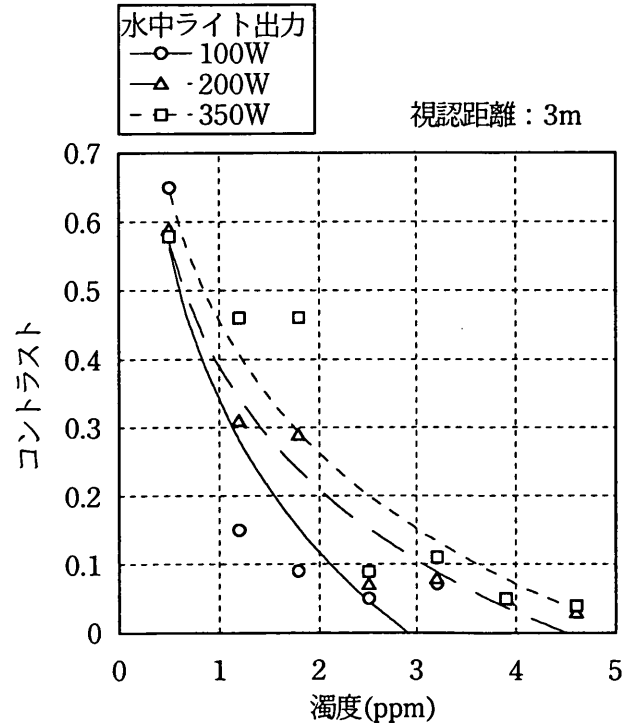
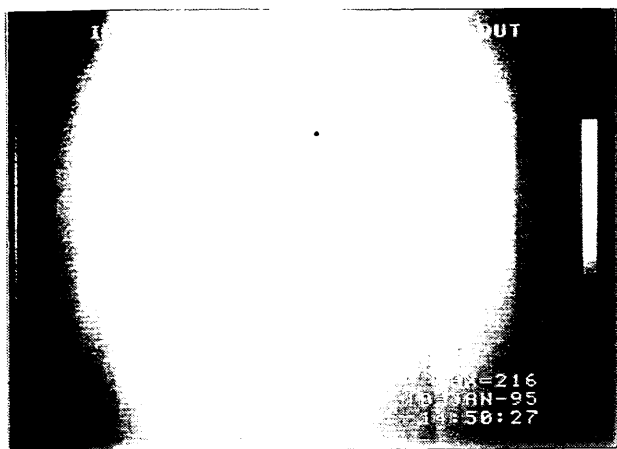
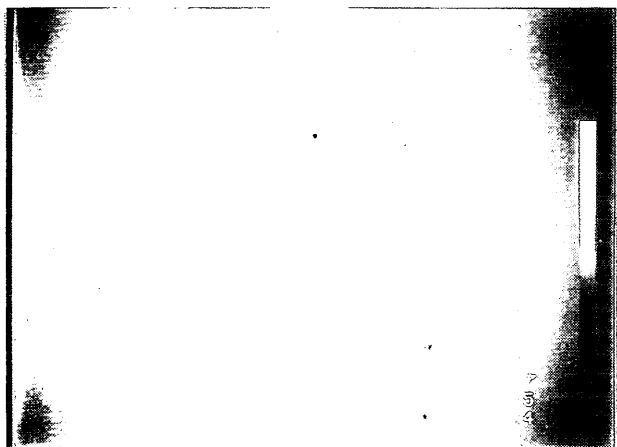


図-36 従来型カメラ視認性の水中ライト出力依存

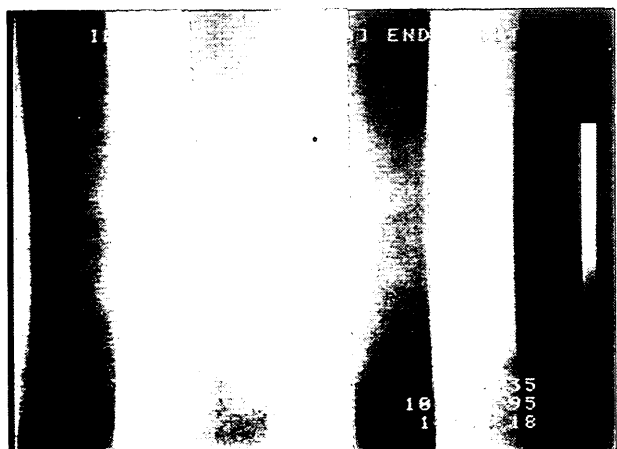
視認距離:2m 濁度:3.2ppm



水中ライト出力:100W コントラスト:0.06



水中ライト出力:200W コントラスト:0.13



水中ライト出力:350W コントラスト:0.22

写真-14 従来型水中テレビカメラ照明出力依存性

影響が小さくなったためと考えられる。また、最短視認距離である1mでは従来型照明照射パワーが小さくても十分な光量が得られるため顕著な差は見られなかった。

### 3.3 実用化のための要素実験

#### (1) レーザーパルス繰返し数依存性確認実験

視認性能のレーザーパルス繰返し数に対する依存性を確認するものである。実験は水道水を満たした水槽内で水中レーザー視認実験装置を用いてコントラストチャートを視認して行い、レーザーパルスの繰返し数を6種類に変化させて得られた画像をコントラスト値の変化として定量的に評価する。パルス繰返し数は50Hz以下を主とし、パルス繰返し数の実用的最低限度を調べることによりレーザー発振器の小型化を図ることを目的とする。

本実験結果を図-37、写真-15に示す。これから、25Hzの視認性が実用レベルでの最低繰返し数と考えられる。実用レベルとは目視による判断より、視認可能と判断できるレベルのことである。55Hzが50Hzよりコントラスト値が低くなっているのは、55HzのみYAG-SHGでありパルス波形がだれているためであることがわかった。

#### 実験条件

レーザー: YAG-OPO, YAG-SHG  
出力: 5mJ  
波長: 532nm  
撮像角度: 30deg  
濁度: 0.8ppm  
視認距離: 3m

- YAG-OPO
- YAG-SHG

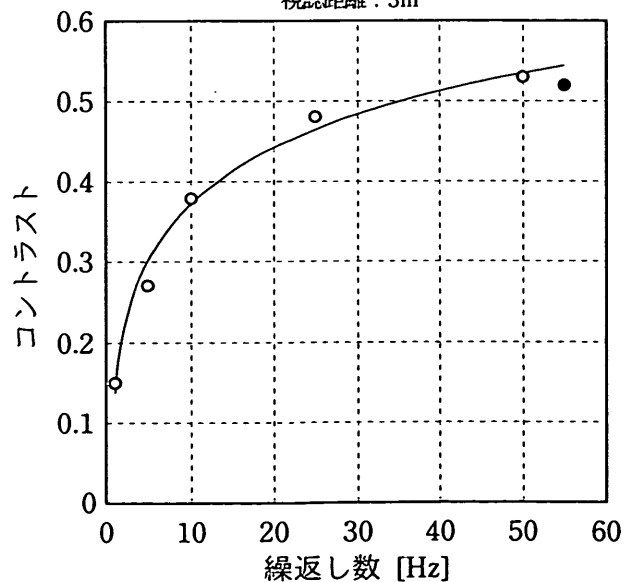
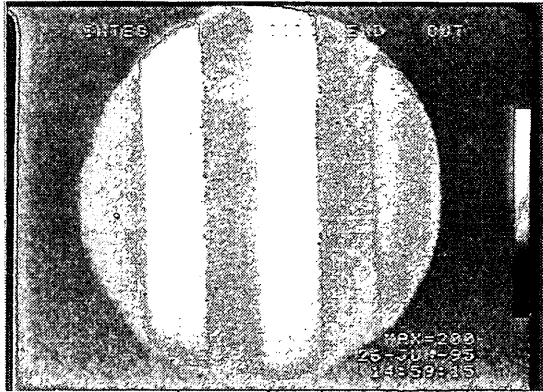
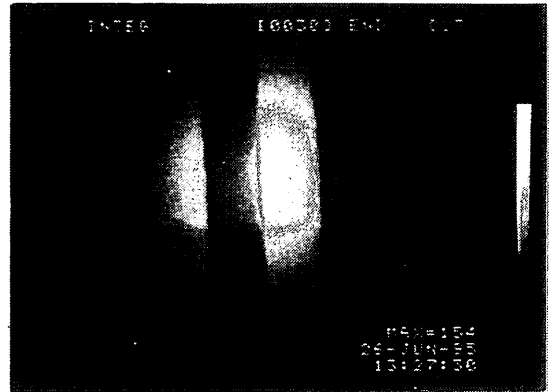


図-37 コントラストのレーザーパルス繰返し数依存性

使用レーザー発振器：YAG-OPO・YAG-SHG，出力：5mJ，波長：532nm  
濁度：0.8ppm 視認距離：3m 撮像角度：30°



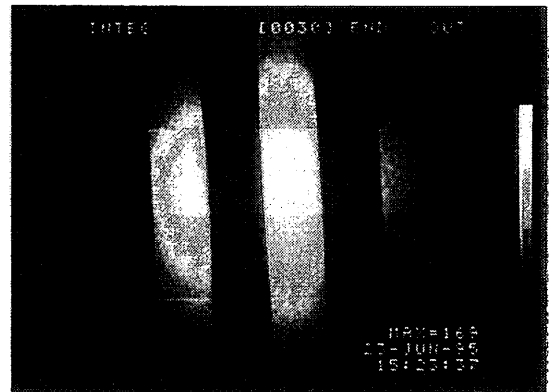
YAG-OPO 繰返し数：1Hz



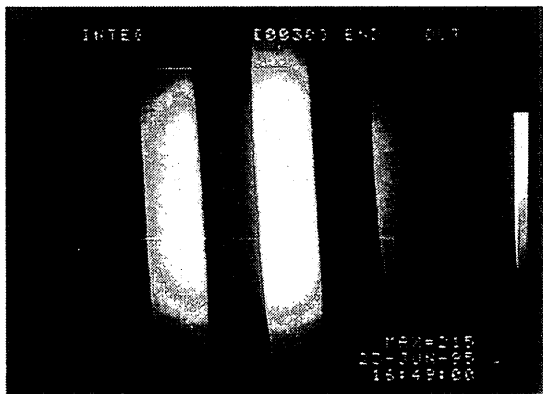
YAG-OPO 繰返し数：5Hz



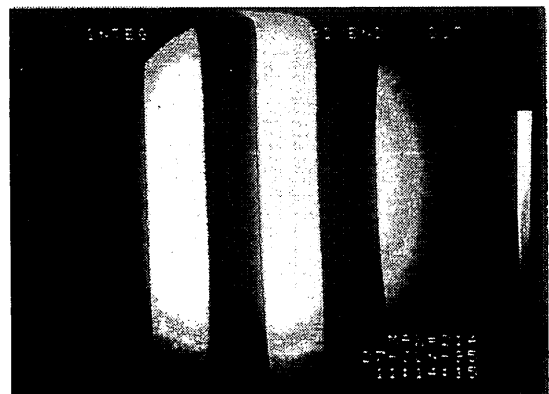
YAG-OPO 繰返し数：10Hz



YAG-OPO 繰返し数：25Hz



YAG-OPO 繰返し数：50Hz



YAG-SHG 繰返し数：55Hz

写真-15 レーザーパルス繰返し数依存性



(2) 反射材に関する実験

a) 基本性能確認実験

各種反射材の水中における基本性能を確認するために、水道水中で反射材を貼付けたコントラストチャートを視認して、得られた画像から反射材ごとのコントラスト値を求めるものである。反射材はキューブコーナー、ガラスビーズ、銀テープ（アルミテープ）の3種類とし、撮像角度を3種類に変化させてそれぞれの反射材について撮像角度とコントラスト値の関係を求める。実験結果を図-38、写真-16に示す。

コントラスト値は全体を通して平均してみるとマイクロプリズムミラーテープ、アルミテープが同程度（0.724, 0.714）であり、ガラスビーズテープ（0.300）、白色テープ（0.211）という結果となった。

実用上反射材としてアルミテープ、または、性質上の相当品である粗い表面仕上げのアルミもしくは耐食性を考慮してステンレスの薄板を可能な限り大きな撮像角度をとって用いるのがよいと考えられる。ただし、撮像角度が小さい場合にはマイクロプリズムミラーテープの方がよい視認性が得られる可能性がある。

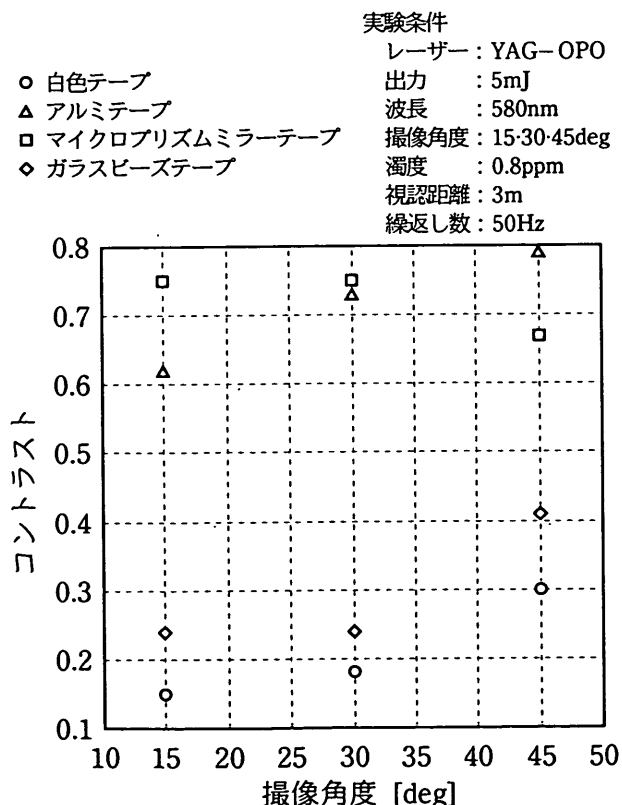


図-38 各種反射材の角度特性 (コントラスト)

b) 視認限界向上確認実験

反射材を貼り付けた場合に、反射材なしの場合に比べてどれだけ視認限界が向上するかを確認するため、視認距離を一定にした状態で反射材を用いて視認を行い、反射材のない場合に対して濁度をどこまで上げられるかを確認する。実験は、まず通常のコントラストチャートを用いて視認限界における濁度とコントラスト値を求め、次に反射材を貼付けたコントラストチャートを用いて徐々に濁度を上げ、通常のコントラストチャートの視認限界におけるコントラスト値と同じになる濁度を求めることによって行う。反射材はa)と同じ3種類とする。また、視認距離は2種類とする。懸濁物質はワイオミングベントナイトを用いる。その結果を図-39、写真-17に示す。

基本性能確認実験と同様にマイクロプリズムミラーテープの性質が顕著に現れ、限界濁度付近で正確に撮像角度（入射角と反射角）を合わせないと高いコントラスト値が得られないため、視認目標の位置調整等が非常に困難であった。それらのことを考慮すると、実用上、性能上共にアルミテープが反射材として適していると考えられる。

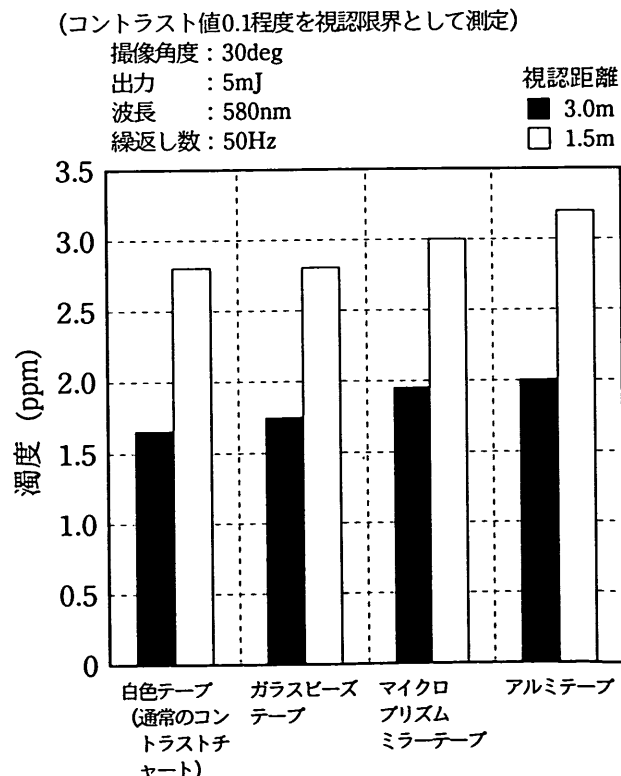
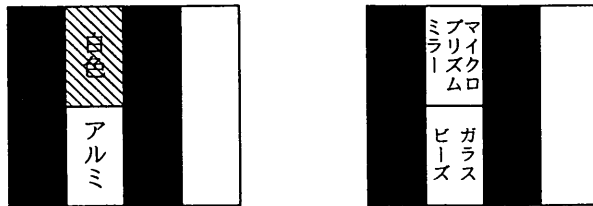
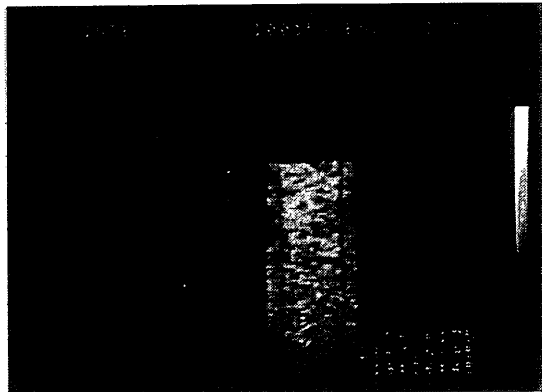


図-39 視認限界向上確認 (コントラスト)

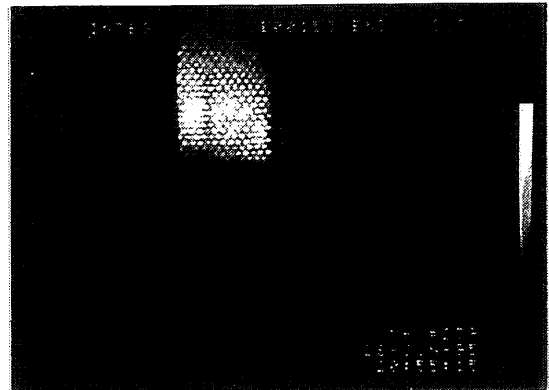
使用レーザー発振器：YAG-OPO，出力：5mJ，波長：580nm  
濁度：0.8ppm 視認距離：3m



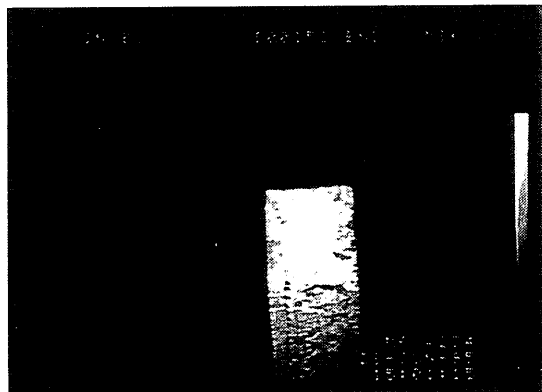
各反射材配置



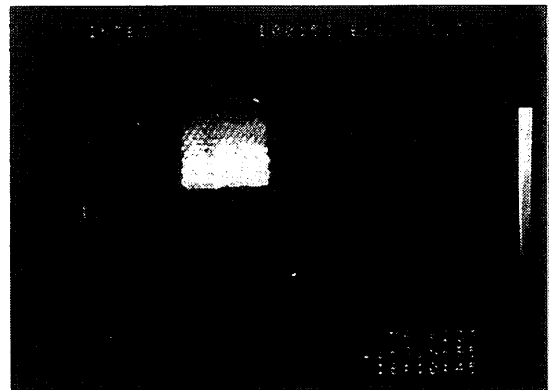
白色-アルミ 15°



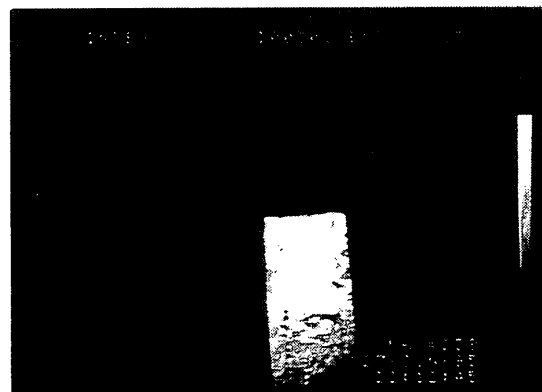
マイクロプリズムミラー-ガラスビーズ 15°



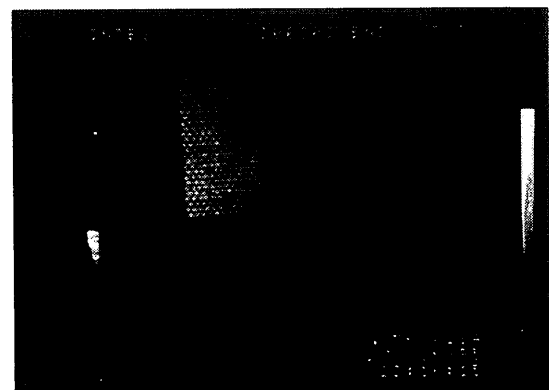
白色-アルミ 30°



マイクロプリズムミラー-ガラスビーズ 30°



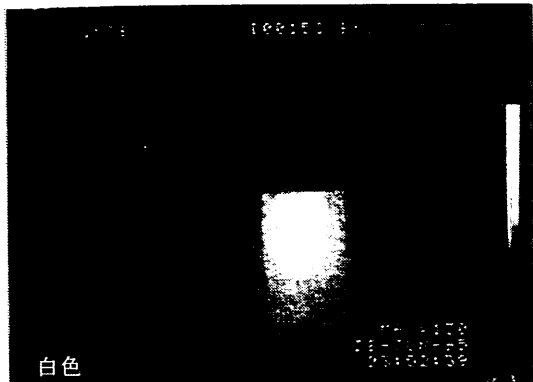
白色-アルミ 45°



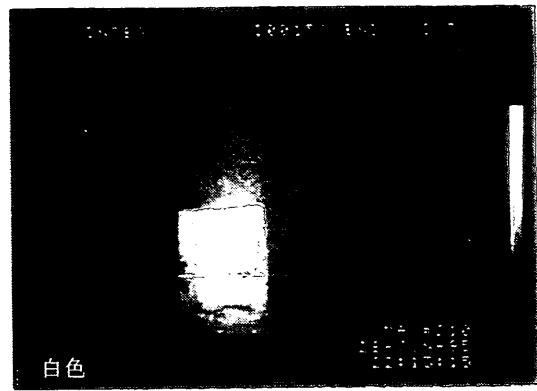
マイクロプリズムミラー-ガラスビーズ 45°

写真-16 各種反射材の角度特性

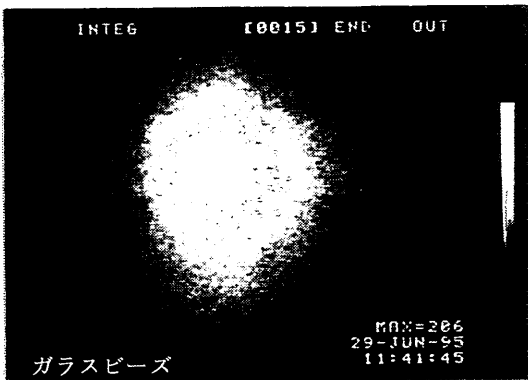
使用レーザー発振器：YAG-OPO，出力：5mJ，波長：580nm 撮像角度：30°



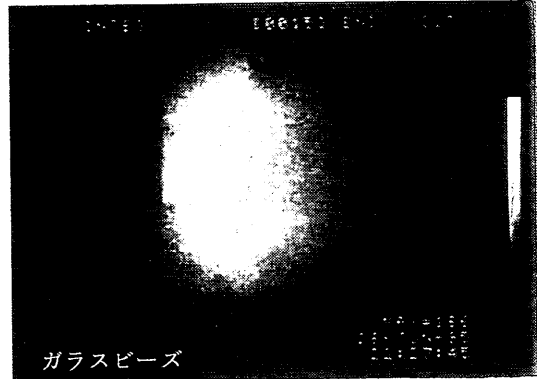
視認距離：1.5m コントラスト：0.10 濁度：2.80ppm



視認距離：3m コントラスト：0.10 濁度：1.65ppm



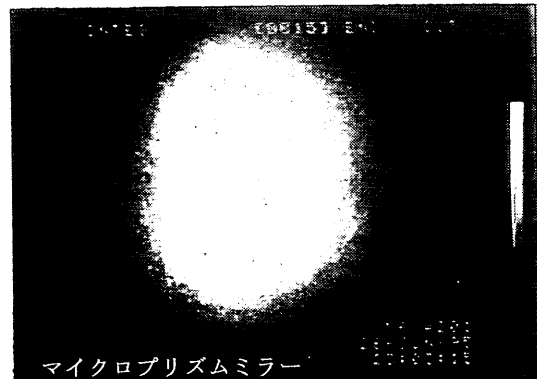
視認距離：3m コントラスト：0.13 濁度：1.75ppm



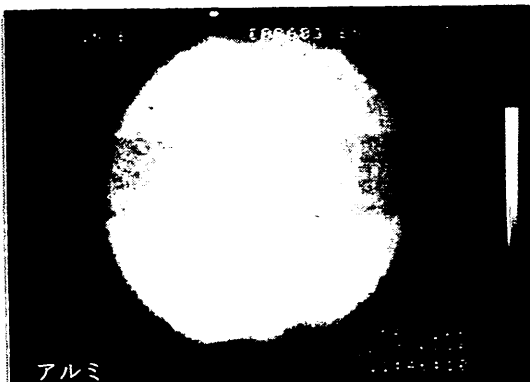
視認距離：1.5m コントラスト：0.09 濁度：2.80ppm



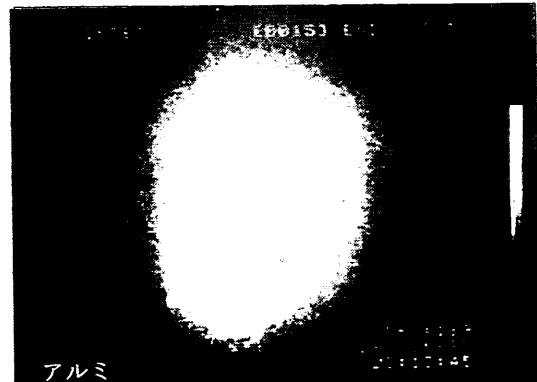
視認距離：1.5m コントラスト：0.11 濁度：3.00ppm



視認距離：3m コントラスト：0.10 濁度：1.95ppm



視認距離：1.5m コントラスト：0.10 濁度：3.20ppm



視認距離：3m コントラスト：0.10 濁度：2.00ppm

写真-17 視認限界向上確認実験画像

#### 4. 現場への適用

水中レーザー視認システムの現場への適用の形態としてはいろいろなものが考えられる。

本研究による成果をもとに石川島播磨重工業株式会社はプロトタイプを改良製作した。これは照射装置と撮像装置を一体化したもので、旋回俯仰装置（パンチルト装置）を装備している。これを用いて各種の用法を開発している。

新潟市信濃川河口に沈埋函工法で建設中の「新潟みなとトンネル」の第1函沈設工事においては、平成8年度に実証試験用として使用された。図-40に沈埋トンネルの沈埋函沈設工事への利用状態模式図、写真-18に水中レーザー視認システムプロトタイプ、表-4に仕様を示す。写真-19は実証試験時の撮影画面である。

従来型テレビカメラでは全く映像は得られず、水中レーザー視認システム画像によりオペレータは自分の判断に確信を持って操函を行うことができたとのことである。また、このときあらかじめ既設の仮受ブラケットに取付けた目盛りを沈埋函側の仮受ブラケットに取付けたインジケータで指すようにし、それを水中レーザー視認システムで視認することにより見るだけでなく定量的な計測を行った。

写真-20に水中バックホウへの搭載状態を示す。これは平成9年度に宮古島の平良港で実証試験を行ったときのものである。写真-21に示すように水中レーザー視認システムプロトタイプは水中バックホウ搭載用に旋回俯仰装置を小型に改造した。仕様を表-5に示す。この実験により水中作業機械の視認システムとしての水中レーザー視認システムの可能性が検証された。

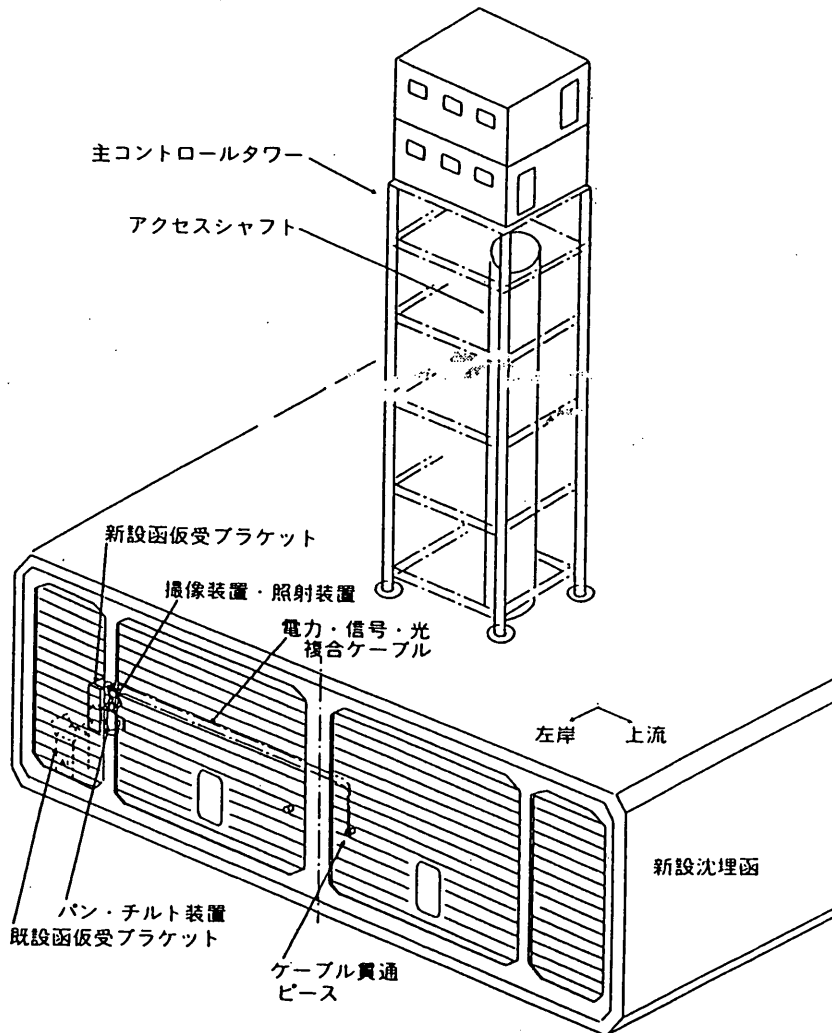


図-40 沈埋トンネルの沈埋函沈設工事への利用状態模式図

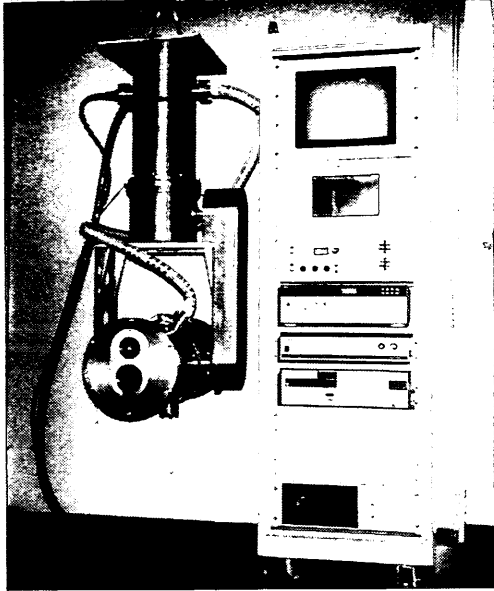


写真-18 水中レーザー視認システムプロトタイプ

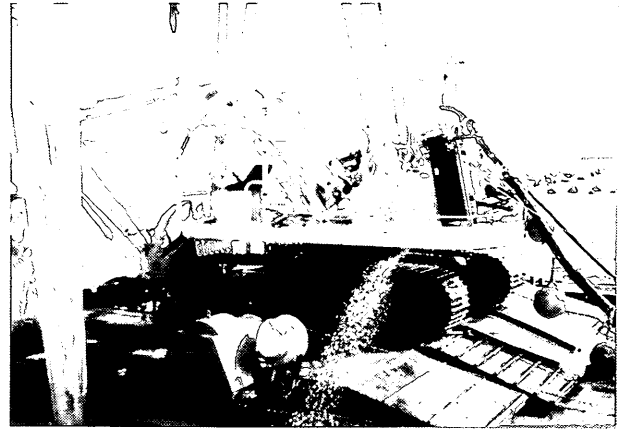


写真-20 水中バックホウへの搭載状態

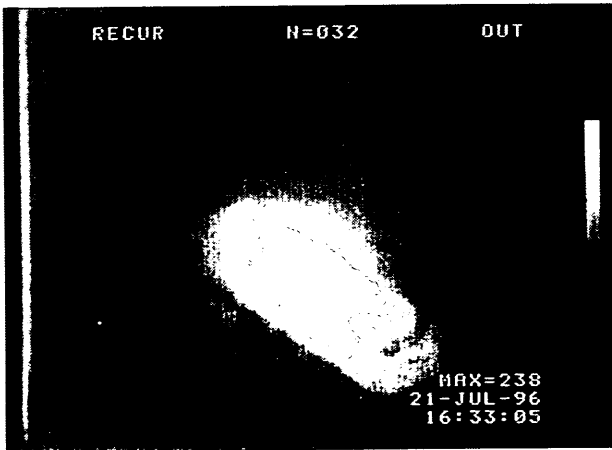


写真-19 新潟みなとトンネル実証試験時の撮影画面

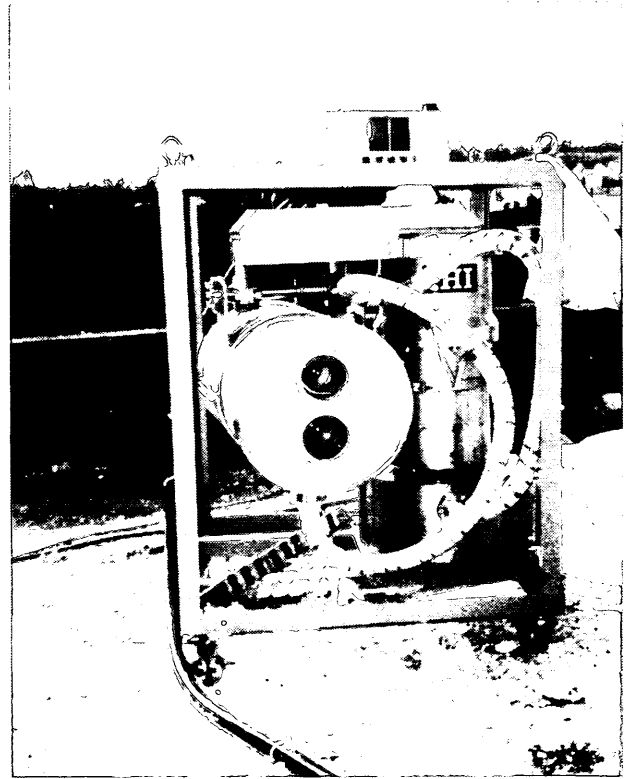


写真-21 小型化した水中レーザー視認システムプロトタイプ

表-4 水中レーザー視認システムプロトタイプ仕様

寸法	Φ310×660 (mm) 取付枠を含まない
重量	空中：50kg 水中：3kg
画角	撮影距離1mで直径0.5mの視野 撮影距離3mで直径1mの視野
旋回俯仰装置	旋回（パン）180度 俯仰（チルト）+10～-90度
発振波長	450～680nm
出力	10mJ/パルス
繰返し数	50Hz

表-5 小型化した水中レーザー視認システムプロトタイプ仕様

寸法	Φ300×670×1000 (mm) 取付枠含む
重量	空中：20kg 水中：中性浮力
画角	撮影距離3mで1×1mの視野 (テレビ画面全体をカバー)
旋回俯仰装置	旋回（パン）180度 俯仰（チルト）70度
発振波長	450～680nm
出力	10mJ/パルス
繰返し数	50Hz

## 5. 結論

1) 最適レーザー照射パワーは、おおむね、近距離、低濁度では2.5ないし5mJ、遠距離、高濁度では5ないし10mJと考えられる。

2) コントラスト値に対する視認距離の影響として、濁水中では視認距離の増大にともない、明確にコントラスト値が低下することが観察された。

3) コントラスト値の濁度依存性が認められた。

4) 一貫したコントラスト値の撮像角度依存性は認められなかった。肉眼で見るかぎり90°が最もよく見えるようである。

5) ある程度の距離、濁度まではイメージインテンシファイア・ゲインを高めることによって、コントラストの改善が可能である。

6) 水中レーザー視認実験装置と従来型水中テレビカメラの視認性を比較したところ、視認距離が長く濁度が高い場合には、水中レーザー視認実験装置の方が良い視認性を有していた。

7) 水中レーザー視認実験装置の視認性のレーザー照射パワーに対する依存性  
比較的短い視認距離である1、2mで、かつ、高い濁度（視認不可となる濁度付近）の場合、レーザー照射パワーの大きい方が良いという結果が得られた。

8) 水中レーザー視認実験装置の波長による視認性はほぼ実験全体を通して500nmで比較的悪く、550、620nmで比較的良いという結果が得られた。しかしながら、ワ

イオミングベントナイトを懸濁物質として使用した実験に比べるとレーザー波長に顕著には依存していない。実験で懸濁物質として使用した関東ロームの粒径が比較的大きいことによるものと考えられる。

9) 従来型水中テレビカメラの視認性は、照明照射パワーが大きいものほど良い。

10) レーザーパルス繰返し数は25Hzが実用レベルでの最低繰返し数と考えられる。

11) 実用上反射材としてアルミテープ、または、性質上の相当品である粗い表面仕上げのアルミもしくは耐食性を考慮してステンレスの薄板を可能な限り大きな撮像角度をとって用いるのがよいと考えられる。

12) 視認限界向上には、実用上、性能共にアルミテープが反射材として適している。

## 6. おわりに

レンジゲート方式の水中レーザー視認システムで実際に製作されたものはほとんどなく、今回使用したもののよう実用的な出力を持っているものはない。特に、波長可変型は世界で初めてであり、これを用いた一連の画像化実験を、計画的、網羅的に行い、濁水中での性能を定量的に明らかにした。

港湾工事水域は濁りが大きいため、大水深・大規模・急速施工においては、高度な視認技術が工事の安全性や経済性に大きな影響を与える。

また、台風、地震等による被災時においては普段よりも濁りが激しくなり、水中部被災状況調査に困難がある

が、本研究成果を用いれば濁りの残った状態で被災状況を把握でき早期復旧に資することができる。

さらに、最近開発の進んでいる水中バックホウ等の水中作業機械は現状では潜水士搭乗型であるが、大水深工事への対応のために遠隔操縦型の方向に技術開発が進むことが予測される。その場合、作業による濁りに対する水中作業機械の視認システムとしての要請も大きく、本研究成果が役立つことを望むものである。

以上とは別に、水中レーザー視認システムを波長可変にするためのOPO装置により発振レーザー出力の効率が1割程度に低下するので、一定の用途用には固定波長にして図-41に示すように小型化した潜水士可搬型水中レーザー視認システムを開発することも考えている。

なお、本稿に述べた水中レーザー視認システムの画像化研究は当所機械技術部ロボティクス研究室と石川島播磨重工業株式会社との共同研究であるが、水中レーザー視認システムのトータルシステムの開発と実工事への適用性実証実験は第一港湾建設局新潟機械整備事務所が石川島播磨重工業株式会社との共同技術開発で行っている。本研究は、その結果を参考に実施されたものであることを明記し、関係者の協力と御支援に感謝するものである。

また、本研究を含めた「水中レーザー計測視認システム」は、社団法人全日本建設技術協会が主催する平成7年度全建賞調査研究部門を、平成8年6月28日に第一港湾建設局新潟機械整備事務所、港湾技術研究所、石川島播磨重工業株式会社と共同で受賞している。

(1998年3月31日受付)

#### 参考文献

1) Yoshiharu NAKAZONO, Kyu YOSHIMORI: Underwater Characteristics of Laser for Depth Sounder, *10th Subsea Intervention Conference & Exposition(ROV92)*, Jun. 1992

2) 高橋英俊・佐藤栄治・中園嘉治: レーザー光を用いた測深機的能力推定に関する基礎実験, 港湾技研資料No. 768, 1994年3月, 33p.

3) 高橋英俊・森実紀夫・斎藤利貴・剣持庸一・高橋義明・朝妻春和: 可視領域における濁水中減衰係数の濁度および粒径依存性, レーザ・レーダ研究会・(財)光産業技術振興協会第16回レーザ・センシング・シンポジウム予稿集, 1993年6月, pp. 109~110

4) 剣持庸一・斎藤利貴・森実紀夫・高橋義明・朝妻春和・高橋英俊: 水中レーザー視認システム, 日本造船学会第12回海洋工学シンポジウム予稿集, 1994年1月,

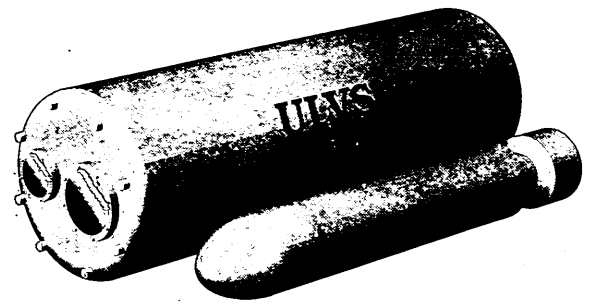


図-41 可搬型水中レーザー視認システム

pp. 601~608

5) 高橋英俊・佐藤栄治: 濁水中におけるレーザーの減衰に関する実験, 港湾技研資料No. 769, 1994年3月, 11p.

6) 佐藤栄治・秋園純一・高橋英俊: 水中レーザー視認実験装置の設計製作, 港湾技研資料No. 825, 1996年3月, 24p

7) Hidetoshi TAKAHASHI, Hisao KATO, Masato NAKAMICHI, Masaaki TAMURO, Yoichi KEMMOCHI, Toshitaka SAITO, Mikio MORI, Yoshiaki TAKAHASHI, Harukazu ASATSUMA, Shiro ISHIDA, Underwater Laser Viewing System, The International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), *Proceedings of the Fourth(1994) International Offshore and Polar Engineering Conference*, April 1994, pp. 614-621

8) 運輸省港湾技術研究所・運輸省第一港湾建設局・石川島播磨重工業株式会社: 新装置紹介 水中レーザー視認システム, 日本作業船協会作業船第215号, 1994年9月, pp. 26~30

9) 斎藤利貴・剣持庸一・高橋義明・朝妻春和・高橋英俊・加藤久雄・中道正人: 水中レーザー視認システム, 計測自動制御学会第11回回センシングフォーラム, 1994年10月, pp. 13~18

10) 高橋義明・高橋英俊・秋園純一・加藤久雄・中道正人・剣持庸一・斎藤利貴・朝妻春和・石田司朗・町田生五月: 水中レーザー視認装置の開発, 土木学会海洋開発論文集VOL. 11, 1995年6月, pp. 277-282

11) 秋園純一・佐藤栄治: 水中レーザーを用いた視認システムの開発, 平成7年度港湾技術研究所講演会講演集, 1995年11月, pp. 69~106

12) 秋園純一: 水中レーザー視認システム, マリンボイス21第190号, 日本埋立浚渫協会, 1996年7月, pp. 8~11

- 1 3) 酒井浩・広瀬憲治・増門孝一・五十嵐浩俊・秋園純一・高橋義明・朝妻春和・斎藤利貴・藤井一郎・町田生五月：水中レーザーテレビ，テクノオーシャン' 96 国際会議予稿集，1996年10月，pp.449-453
- 1 4) 酒井浩：水中レーザーテレビカメラ，土木技術50 巻11号，土木技術社，1996年11月，pp.40~46
- 1 5) 酒井浩：技術の最前線から「水中レーザー視認システム」，*Coastal Development* No.25，(財)沿岸開発技術研究所，1996年12月，pp.52~59
- 1 6) 斎藤利貴・高橋義明・朝妻春和・藤井一郎・酒井浩・広瀬憲治・五十嵐浩俊・伊賀浩之・秋園純一・佐藤栄治・田中敏成：水中レーザーテレビ，第19回光波センシング技術研究会予稿集，(社)応用物理学会，pp.31-37，1997
- 1 7) S.Q.DUNTLEY: Light in the sea, *J. Opt. Soc. Am.*, Vol.53, 1963, p.214
- 1 8) Howard J. Okoomian: Underwater Transmission Characteristics for Laser Radiation, *APPLIED OPTICS Vol.5 No.9*, Sept. 1966
- 1 9) 中尾 定彦：レーザ光の水中伝播に関する研究，1979年
- 2 0) 杉森康宏・坂本亘：海洋環境光学，東海大学出版会，1985年，pp.129-163
- 2 1) 中尾定彦：水中における電磁波の減衰，防衛技術，1987年9月，pp.22-30
- 2 2) Jerlov, N.G.: *Marine Optics*, Elsevier Oceanography Series, N.Y., 1976
- 2 3) Clay, C.S.・Medwin, H.: *Acoustical Oceanography Principles and Applications*, J. Wiley & Sons, N.Y., 1977
- 2 4) T.H.Dixon・T.J.Pivrotto・R.F.Chapman: A Range-Gated Laser System for Ocean Floor Imaging, *MTS Journal*, V17n.3-4, 1984, pp.5-12
- 2 5) Billard, B.・Abbot, R.H.・Penny, M.F.: Modeling depth bias in an airborne laser hydrographic system, *Applied Optics*, Vol. 25, No. 13, July 1986
- 2 6) Klepsvik, J.O.: 3D Underwater Inspection - Optics versus Acoustics, *The 5th International Conference on Electronics for Ocean Technology*, 24-26 March 1987, HeriotWatt University, Edinburgh, Scotland
- 2 7) J.O. Klepsvik・H. O. Torsen・K. Thoresen : Laser Imaging Technology for Subsea Inspection : Principles and Applications, *IRM/ROV 90 Conference*, Aberdeen Exhibition & Conference Center, Aberdeen, Scotland, 6-9 Nov. 1990
- 2 8) Andrew W. Palowitch: The Limits of Optical Imaging System, *Underwater System Design*, March/April 1992