

アブレイシブウォータージェット式水中切断 の安全性の研究

第1報 潜水装備品への直接損傷を避ける距離について

山口 仁士^{*1} 出村 憲二^{*1} 小黒 至^{*1}
岡本 峰雄^{*1} 毛利 元彦^{*1}

水中でアブレイシブウォータージェット式切断を行う場合の安全確保を目的として、この機器による直接損傷可能範囲を把握する実験を行った。

被損傷用試験片として用いたのはウェットスーツ、ドライスーツ及び潜水呼吸用給気ホースの3種類である。

アブレイシブウォータージェット（以下、噴流という）の試験片への照射時間は10秒間とし、ノズル-試料間距離（スタンドオフ）をパラメータとして損傷状況を観察した。

今回の噴流条件では損傷可能なスタンドオフはいずれの試験片でも40cm以下であることが明らかとなった。また、噴流条件の異なる場合については、鋼板の切断深さに関する既存の水中切断の資料から、簡易計算により安全側の損傷可能範囲を算出できるとした。

キーワード：水中，切断，アブレイシブウォータージェット，安全，損傷，障害

A study on the Safety of Abrasive Water Jet Cutting in the Water

1st report. On the distance to avoid direct damage to diving gear

Hitoshi YAMAGUCHI^{*2} Kenji DEMURA^{*2}
Itaru OGURO^{*2} Mineo OKAMOTO^{*2}
Motohiko MOHRI^{*2}

The author has developed a cutting method using abrasive water jet for underwater works. To avoid unexpected direct injury caused by the cutter, safe standoff distance from the jet nozzle of the cutter was measured and is discussed in the present paper.

Three types of sample pieces, wet suit, dry suit and hose to supply breathing air were

* 1 海域開発・利用研究部

* 2 Coastal Research Department

provided for the test. Duration for jet hitting was adjusted to ten seconds by employing a steel cover. Standoff distance between the sample and nozzle was varied for each sample.

Damage caused by the abrasive water jet to each sample was recognized at a distance less than 40cm. Also the distance under a different water jet condition was estimated by using the author's past data.

Key words : Underwater, Cutting, Water Jet, Safety, Damage, Injury

1 はじめに

研磨材を含まないウォータージェットは既に手術用のメスとしても実用化されており、人体組織の一部切除などが可能なツールとして知られ医療の分野にも貢献している。その反面、工業用として使用される大動力のものは、その取り扱いを誤ると事故につながりかねない。空中でのウォータージェットによる人身事故についてはいくつかの報告があるが¹⁾²⁾³⁾、特徴的なものとして約630 kg/cm²の噴流を手にあてたが外傷はなく裏側に細かい水泡が生じ、後に消失した軽度の事例⁴⁾や腹部に噴流を当て小孔を伴う直径5 cmの腫れが認められた後、48時間経過して腹膜炎を併発した重度の事例⁵⁾などを上げることができる。

一方、研磨材を使用するアブレイシブウォータージェット切断の場合は噴流によるダメージは大きく、身体各部の裂傷、挫傷から切断、さらに死亡に至ったものもある⁶⁾。

アブレイシブウォータージェット式切断技術は、従来、空中での切断技術であったため水中での事例は見られないが、切断の対象を選ばず、しかも深度に関わりなく使用できる技術が開発された現在、本技術の将来の普及を念頭に置いた安全対策を策定しておく必要がある。

ところで、マン・マシンシステムの安全確保については一般に空間分離及び時間分離の原則があり、人間の作業空間と機械の作業空間とを分離するものと、同一空間内での作業では人間と機械の作業時間を分離するものとに大別される。実際のシステム化にあたっては空間分離は実質的に困難な場合が多いため時間分離型が多く採用されているが、時間分離型の具体的対策としては、安全な状態にのみ運転が開始される「安全確認型の安全対策」と危険な状態を検知して運転を停止する「危険検出型の安全対策」の2種類があり、両方が準備されることが望ましいとされている⁶⁾。

アブレイシブウォータージェットによる水中切断では、対象が不定形であることが多々予想されるため、装

置や治具の据え付けはダイバー作業が主体となる。よって、空間分離の原則を取り入れることは難しく、的確な時間分離を行う必要がある。

作業の開始時点では、装置や治具の据え付けを終了したダイバーが安全な場所へ避難し、それを確認した後に装置を作動させる手順が踏まれるのが当然となる。これは安全確認型の安全対策といえる。作業終了後、装置の完全な停止を確認してダイバーが機器の取り外しにかかるのも同様な対策である。

また、装置作動中の危険検出の見地からは、ダイバーの不用意な接近やホース類の不測の接近に備えるため、水中テレビカメラ等により監視する方法が有効と考えられる。そのためにはウォータージェット噴流による直接損傷が起こりうる範囲（距離）を知り、カメラの監視範囲を規定する必要がある。無論、ノズル部の固定が確実であることはいうまでもない。

ここでは水中でのアブレイシブウォータージェット噴流による直接損傷について、実験を通して、水中カメラ等による監視範囲の目安を得たので報告する。

2 方法

損傷実験の対象としたのは厚さ5 mmのネオプレン製ウェットスーツ（日本アクアラング製、表面スキン裏面ジャージ）、ドライスーツ（旭潜研製）及び潜水呼吸用給気ホース（ニットムーアカンパニー製、シンフレックスホース、呼び径1/4インチ）の3種である。それぞれを図1に示す試験片固定枠に固定してウォータージェット噴流を垂直に照射し、ノズル-試料間距離（スタンドオフ）を適宜設定して損傷の程度を観察する方法とした。面の広がりを持たないホースの場合は、その側面にウォータージェット噴流を正確にあてることが難しいため、写真1に示すようにホースを照射軸と垂直に並べ固定して試験片とした。

実験装置構成の概念図を図2に示す。試験は水深0.3 mの水中にて行った。

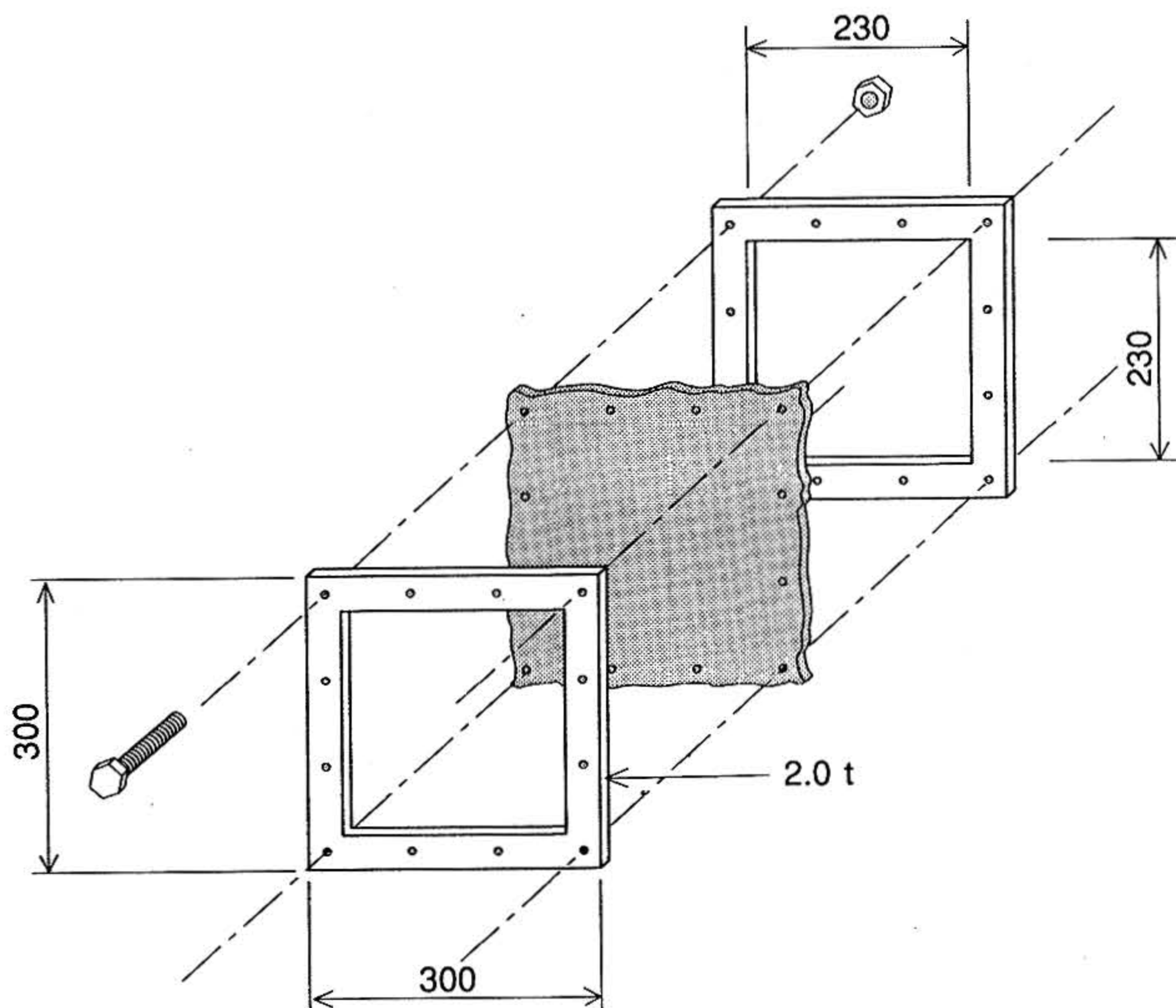


図1 試験片固定枠
Fig. 1 Test piece guide.

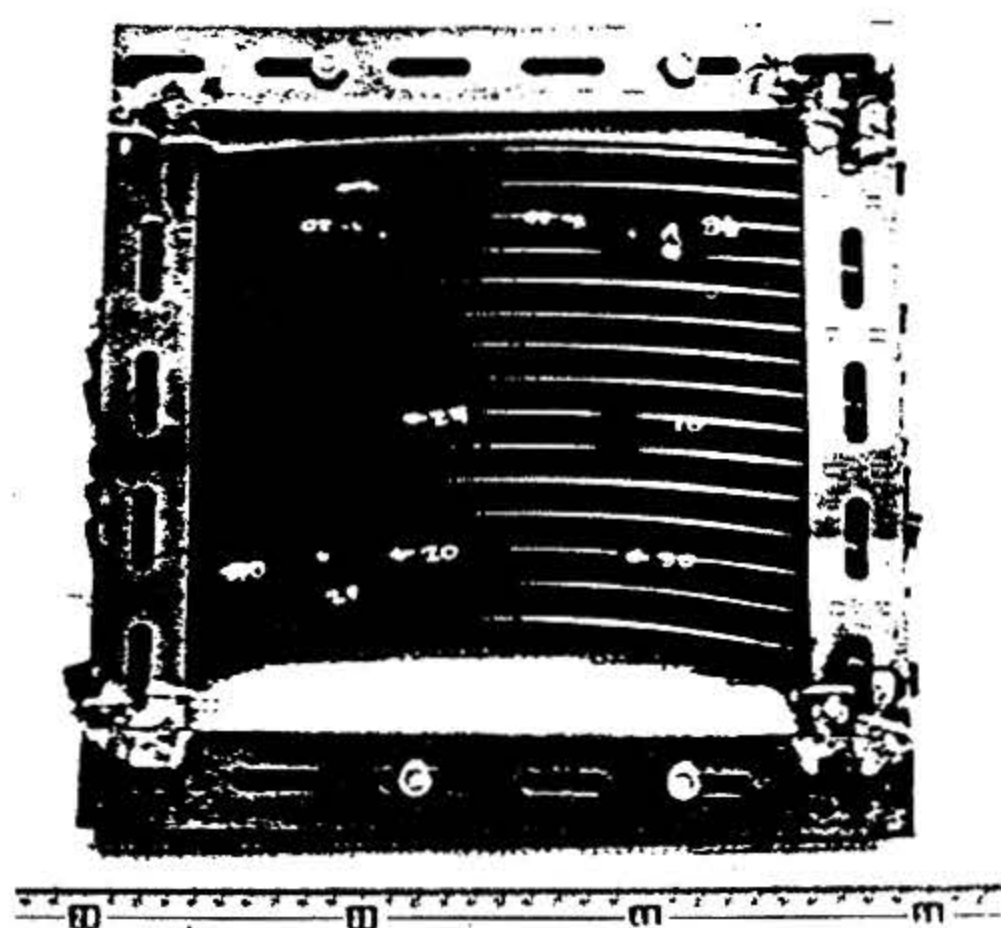


写真1 ホース試験片の固定方法
Photo 1 Hose test piece with test piece guide.

アブレイシブウォータージェット噴流の諸元は次の通りである。

超高圧水圧力 2,000kg/cm²
ウォーターノズル直径 0.7mm

アブレイシブノズル直径 1.5mm
超高圧水量 11.0l/min
アブレイシブ供給量 1.0kg/min
アブレイシブ材質 ガーネット #100

なお、実験には水中用に試作したアブレイシブウォータージェット式水中切断装置⁷⁾を使用しており、アブレイシブは水・ポリマーの混合液に混入しスラリー状態で搬送する方式である。スラリー構成の割合は容積比でアブレイシブ：水：ポリマー＝5：4：1である。

損傷の程度はアブレイシブウォータージェット噴流の照射時間にも依存するが⁸⁾、ここでは鋼板のシャッターを使用して照射時間を一律に10秒間として実験を行った。

3 結果

スタンドオフの変化による各試験片の損傷状況を写真2～13に示す。

ウェットスーツの破孔に大きいものが見られ、またドライスーツの切片が長くなっているのは材料の伸縮ないしたわみによるものと考えられる。

スタンドオフと破損状況の関係をみると、ウェット

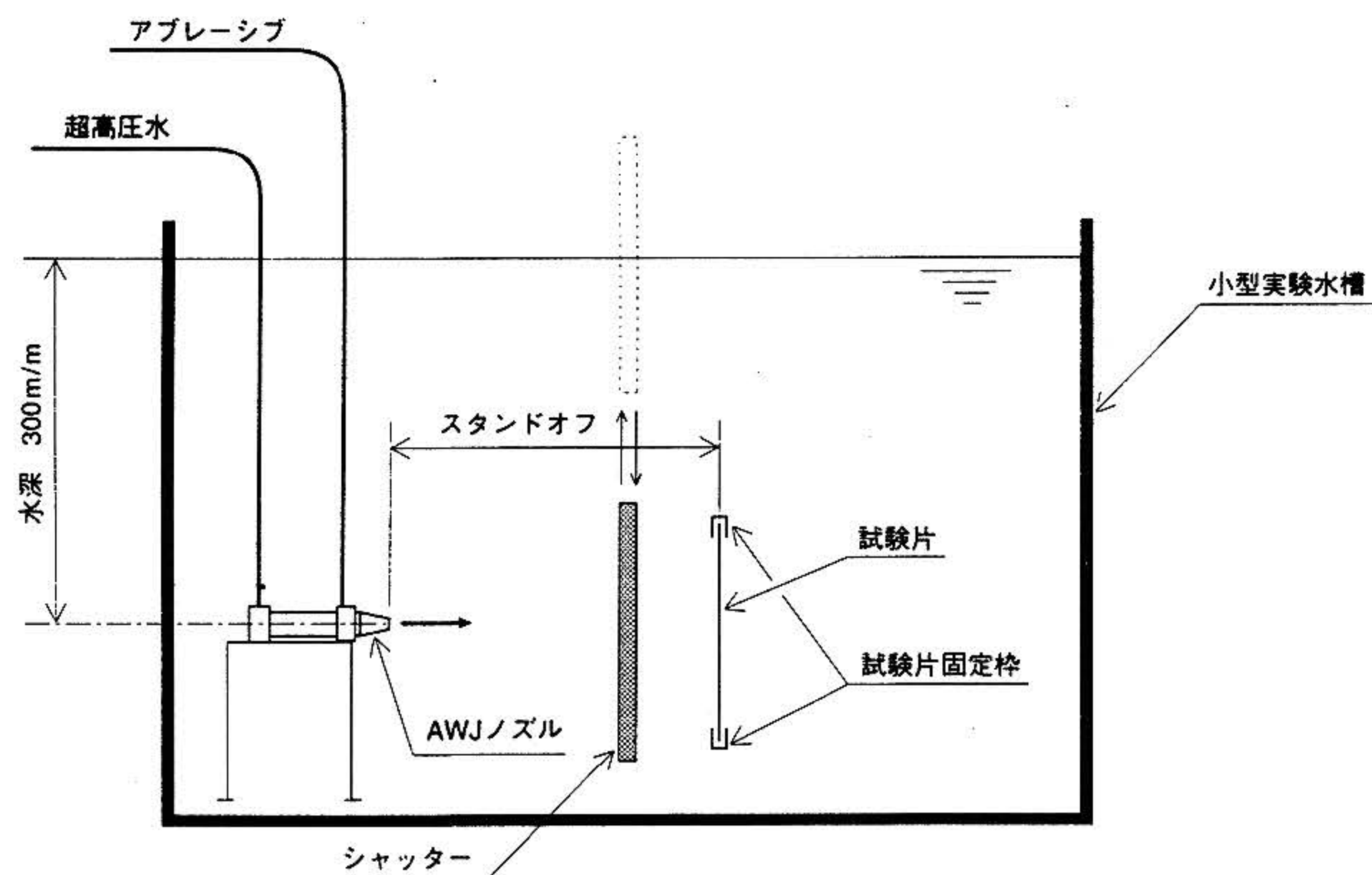


図2 実験装置構成の概念図
Fig. 2 Schematic diagram of experiment.

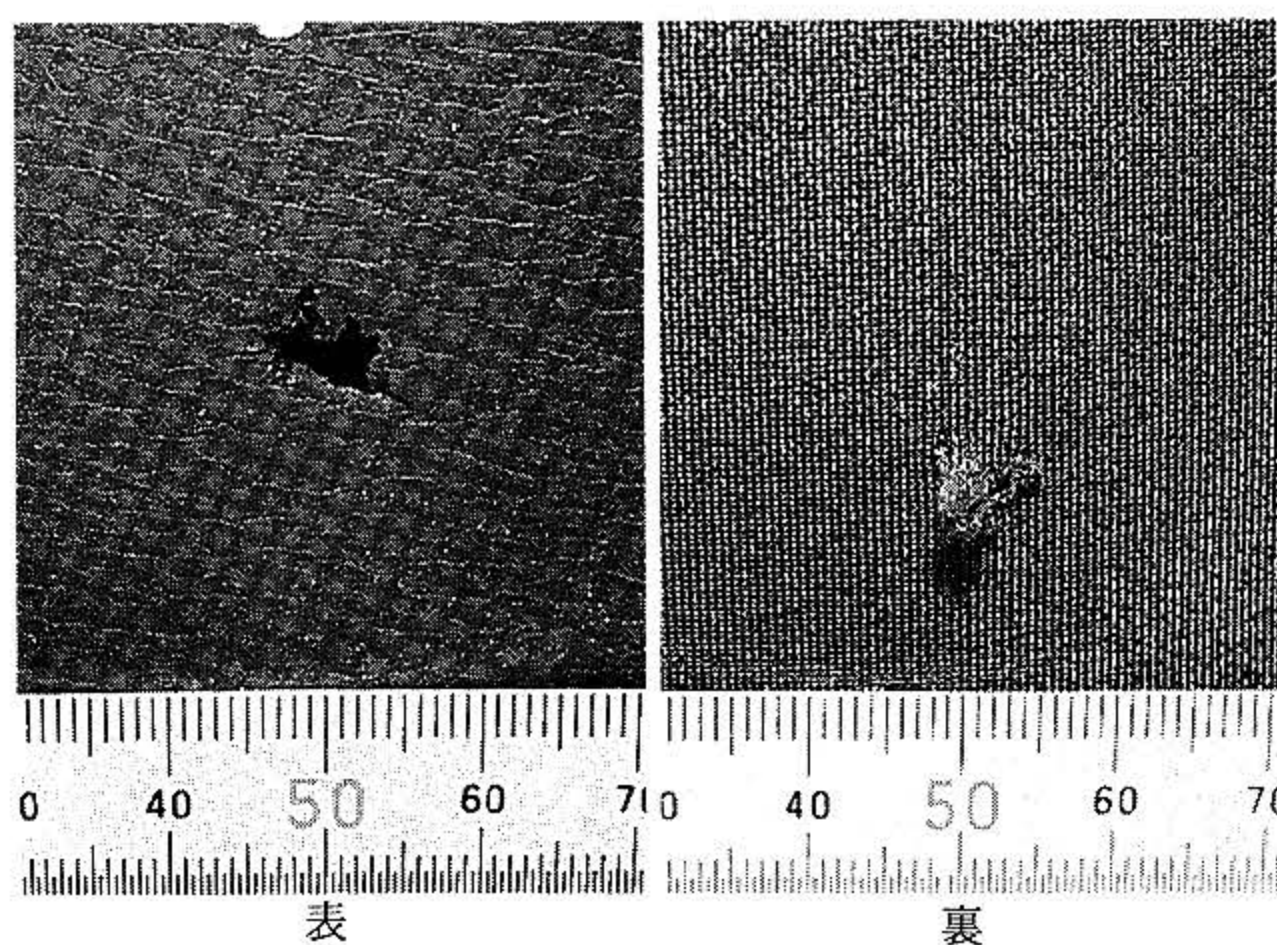


写真2 ウェットスーツの損傷状況 (スタンドオフ10cm)
Photo 2 Damage of wet suit (SOD=10cm).

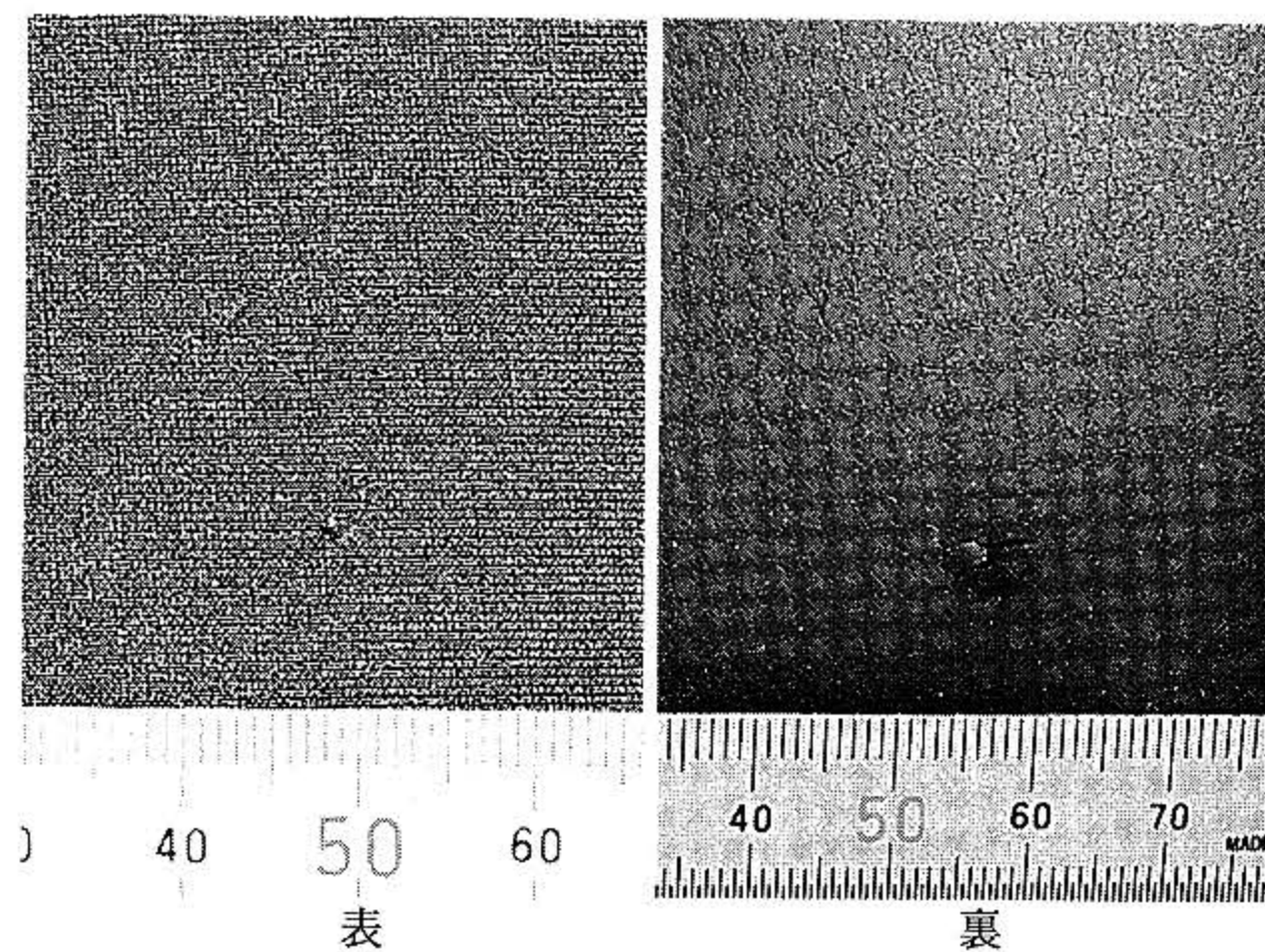


写真4 ウェットスーツの損傷状況 (スタンドオフ20cm)
Photo 4 Damage of wet suit (SOD=20cm).

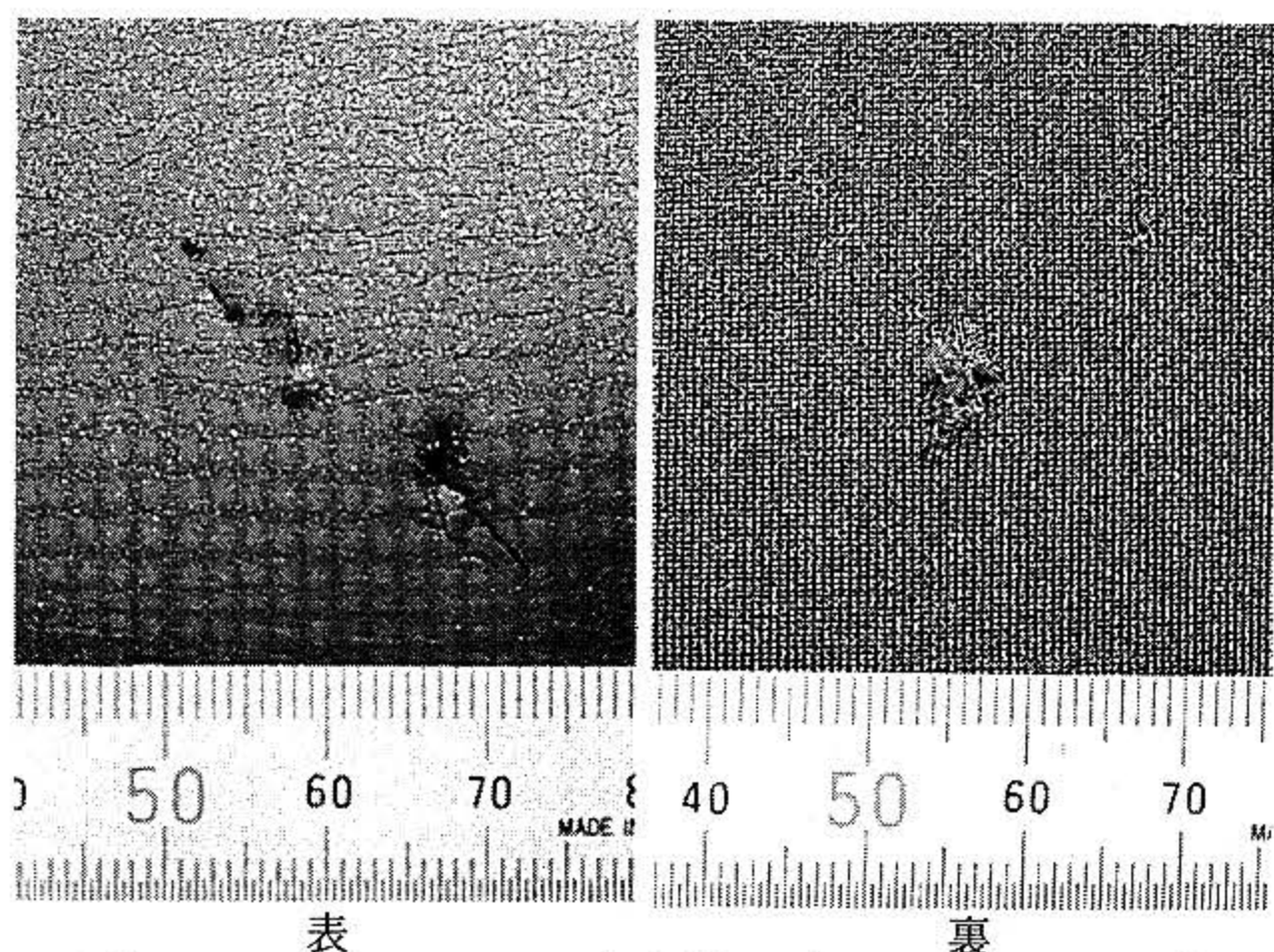


写真3 ウェットスーツの損傷状況 (スタンドオフ15cm)
Photo 3 Damage of wet suit (SOD=15cm).

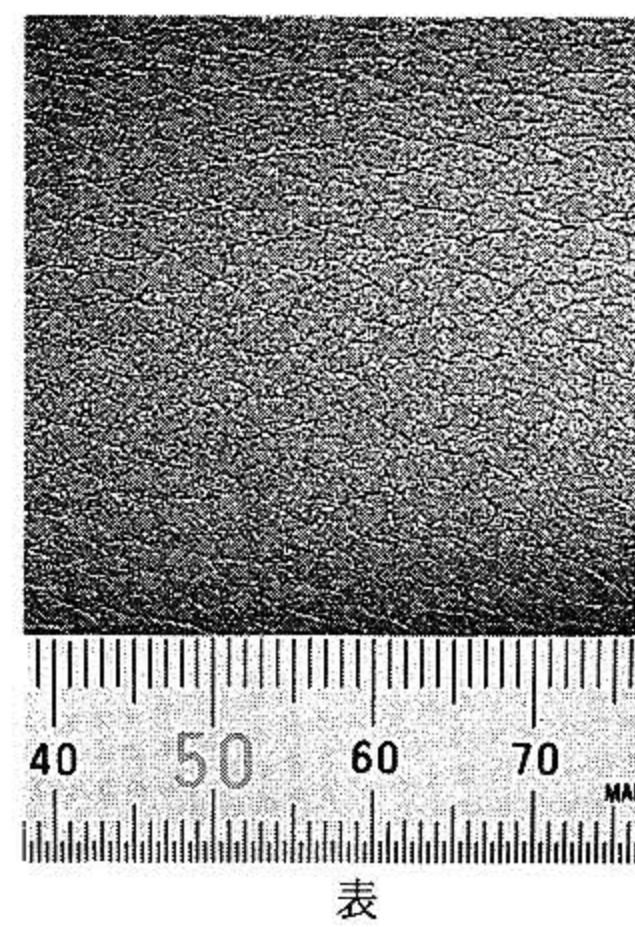


写真5 ウェットスーツの損傷状況 (スタンドオフ25cm)
Photo 5 Damage of wet suit (SOD=25cm).

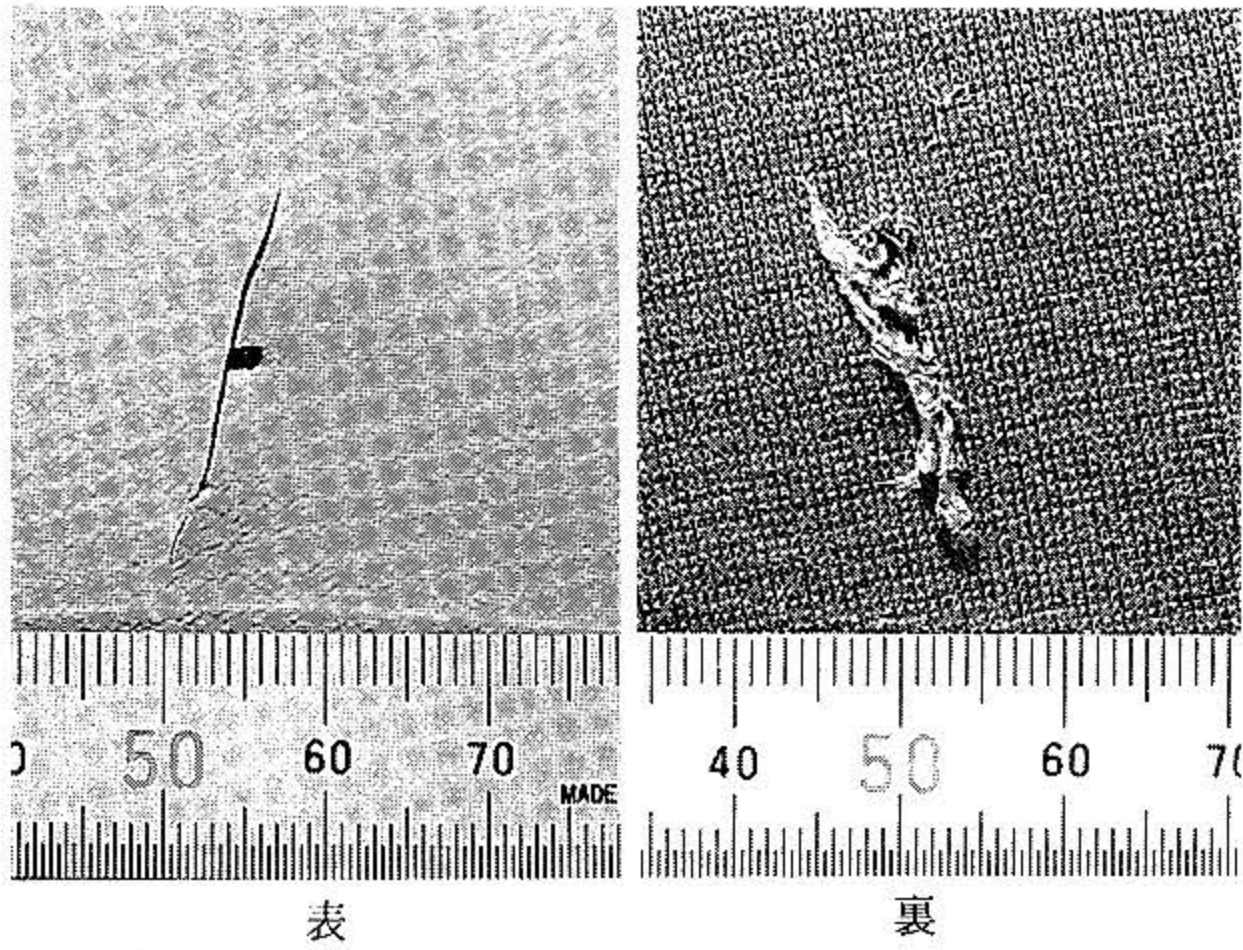


写真6 ドライスーツの損傷状況 (スタンドオフ10cm)
Photo 6 Damage of dry suit (SOD=10cm).

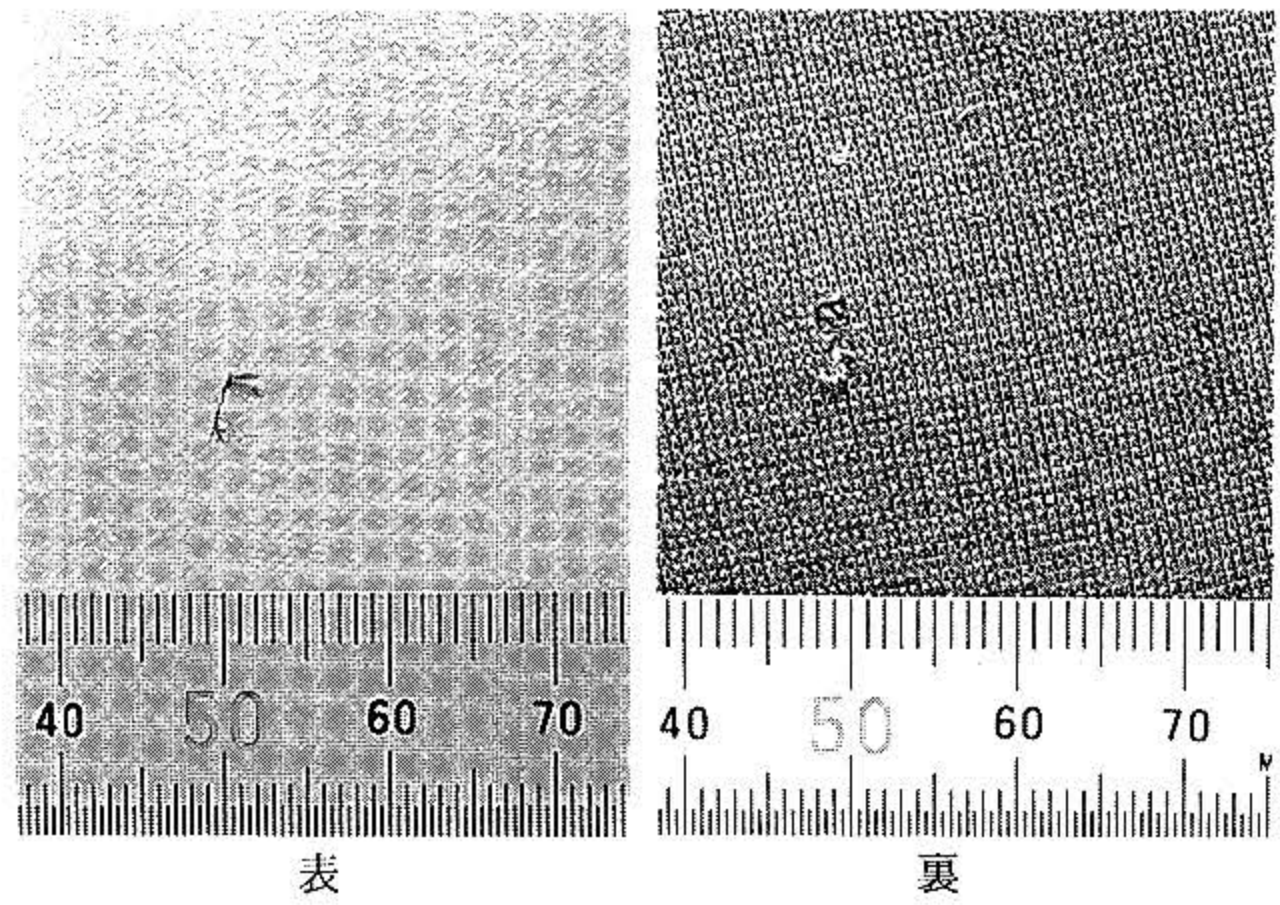


写真8 ドライスーツの損傷状況 (スタンドオフ30cm)
Photo 8 Damage of dry suit (SOD=30cm).

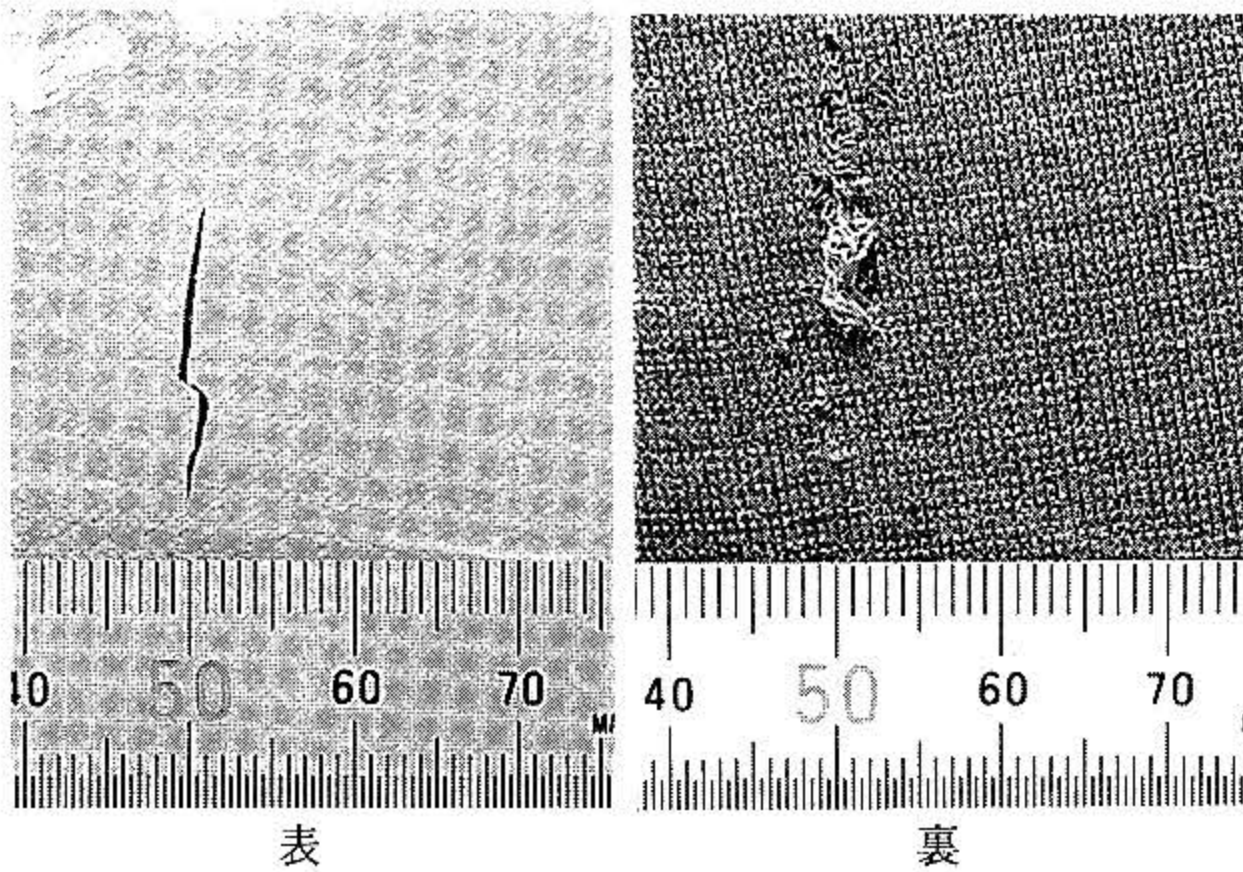


写真7 ドライスーツの損傷状況 (スタンドオフ20cm)
Photo 7 Damage of dry suit (SOD=20cm).

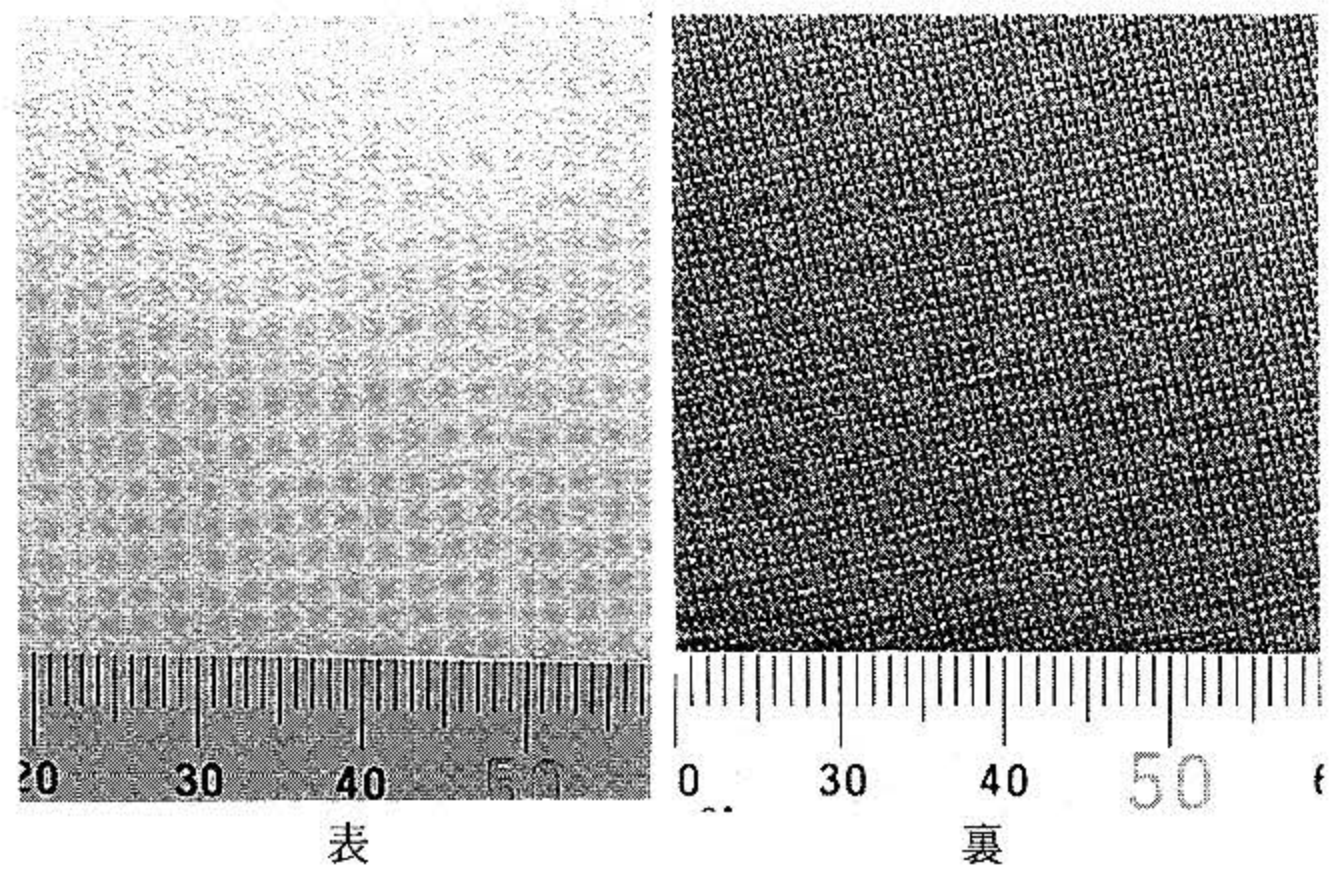


写真9 ドライスーツの損傷状況 (スタンドオフ40cm)
Photo 9 Damage of dry suit (SOD=40cm).

スーツの場合はスタンドオフ10, 15, 20cmでは噴流の貫通により損傷が表裏両面に見られるが(写真2~4), 25cmになると損傷は認められない(写真5)。ドライスーツではスタンドオフ10, 20, 30cmまでは損傷があり(写真6~8), 40cmでは認められなかった(写真9)。ホースでは10cm, 20cmまでは噴流の貫通が認められたが(写真10, 11), 25cmでは被覆の損傷のみにとどまり(写真12), 30cmでは被覆損傷もごくわずかであった(写真13)。

4 考察

損傷程度の理論的予測または損傷程度の定量化が困難なため, 単純な観察結果からの結論になるが, 今回設定した噴流の条件では, スタンドオフを40cm以上とすればいずれの試験片にも損傷はほとんどないことが明らかとなった。よって危険検出型の安全対策の見地からは, 図3に示すようにノズル先端を中心とした半径40cmの球, 又はノズル先端から開く部分球などを監視範囲とす

ることが望ましい。

損傷可能範囲は噴流条件に依存するが, 筆者らの別報⁹⁾による噴流条件と鋼板の切断深さとの資料から概ねの損傷可能範囲は推測可能である。

本報告で扱った水中での開放噴射の場合では噴流のエネルギーが噴射軸の周囲全体に発散し, 距離とともに3次元的に著しく減衰するが, 別報で扱った鋼板切断の場合は, 噴流は鋼板内部の切断溝に沿って移動するため2次元的な減衰となり, 切断に寄与するエネルギーの損失が少ない。即ち噴流エネルギーのスタンドオフによる減衰率が開放水中ではより大きいこととなる。よって今回の試験条件より大きいエネルギーを噴流に与えた場合, 別報からの損傷可能範囲の算出は必ず安全側になると考えられる(図4)。別報のデータのうち, ウォータージェットの出圧圧力を例にとると, 1,000kg/cm²での鋼板切断深さは12mm, 2,000kg/cm²での鋼板切断深さは28mmであり, 圧力が倍になったとき切断深さ, 即ち損傷の程度は2.3倍になっている。開放された噴流の場合,

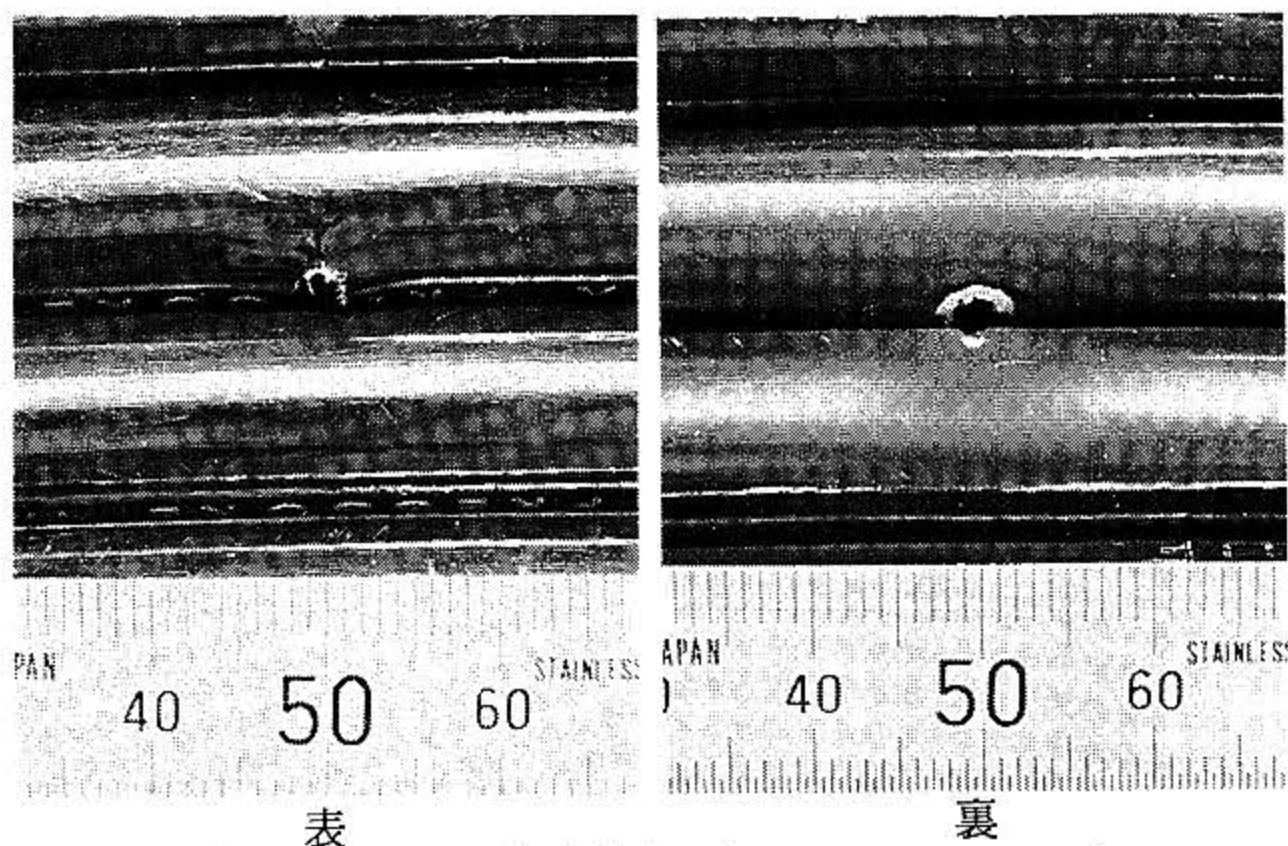


写真10 ホースの損傷状況 (スタンドオフ10cm)
Photo 10 Damage of hose (SOD=10cm).

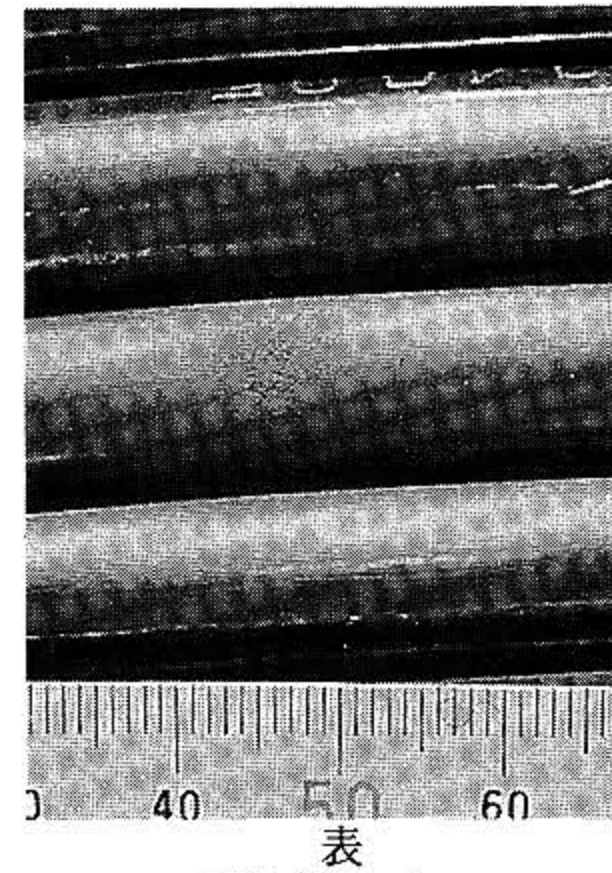


写真12 ホースの損傷状況 (スタンドオフ25cm)
Photo 12 Damage of hose (SOD=25cm).

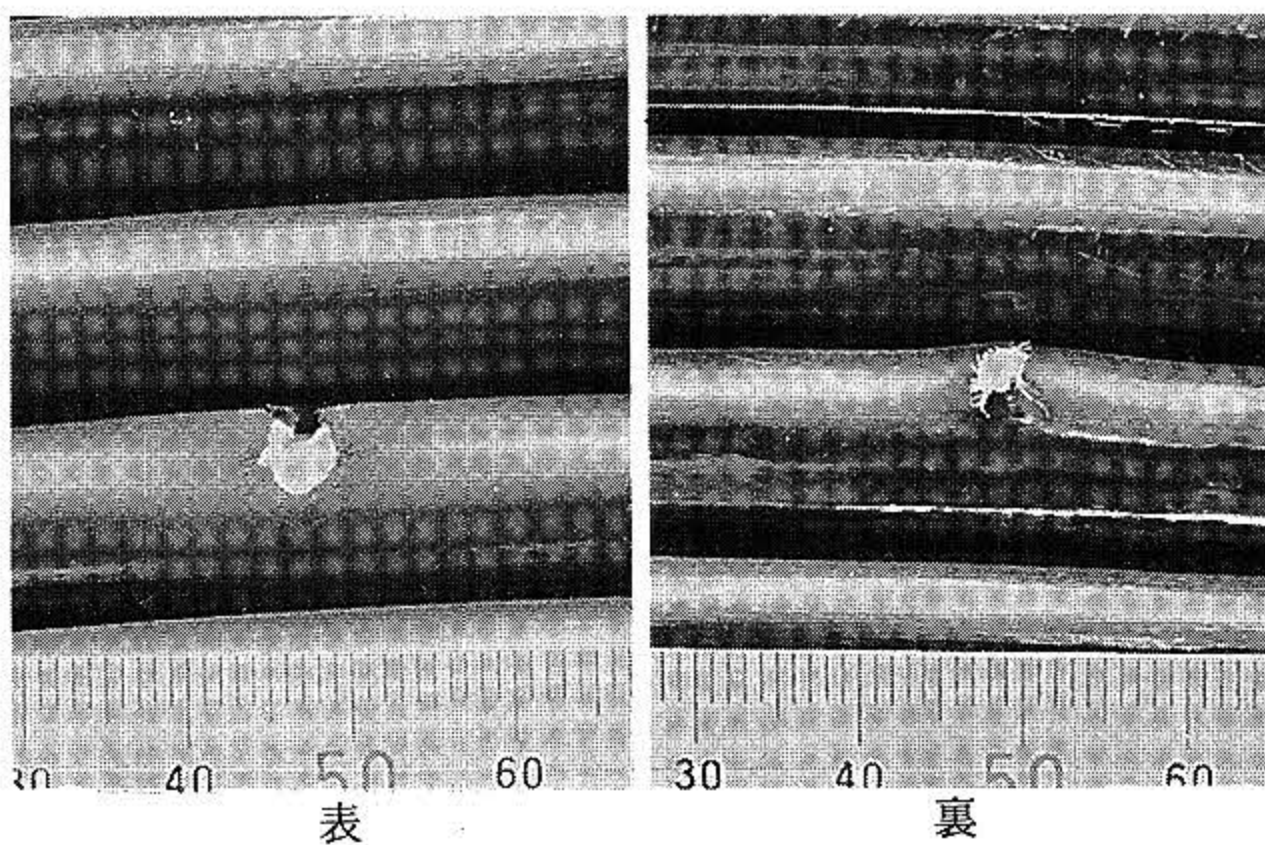


写真11 ホースの損傷状況 (スタンドオフ20cm)
Photo 11 Damage of hose (SOD=20cm).

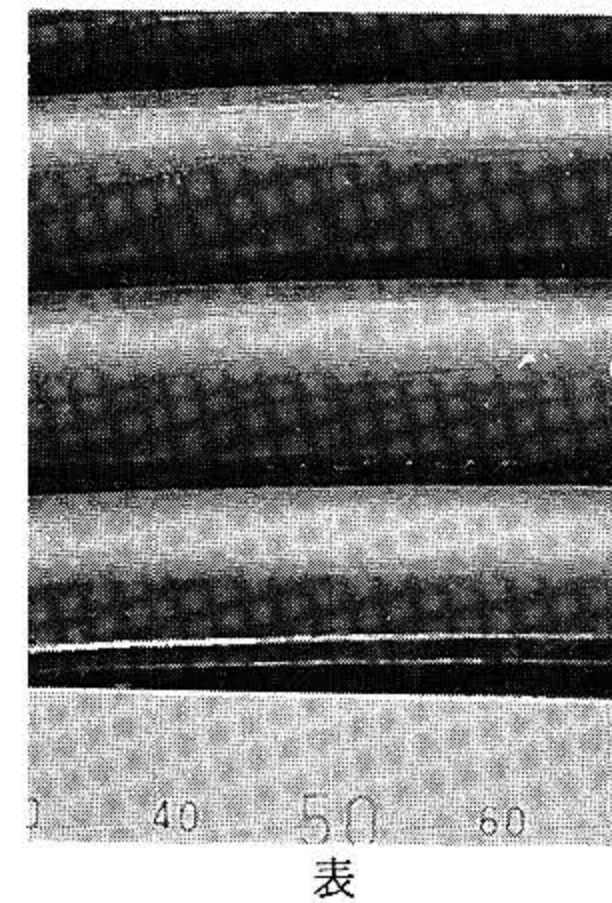


写真13 ホースの損傷状況 (スタンドオフ30cm)
Photo 13 Damage of hose (SOD=30cm).

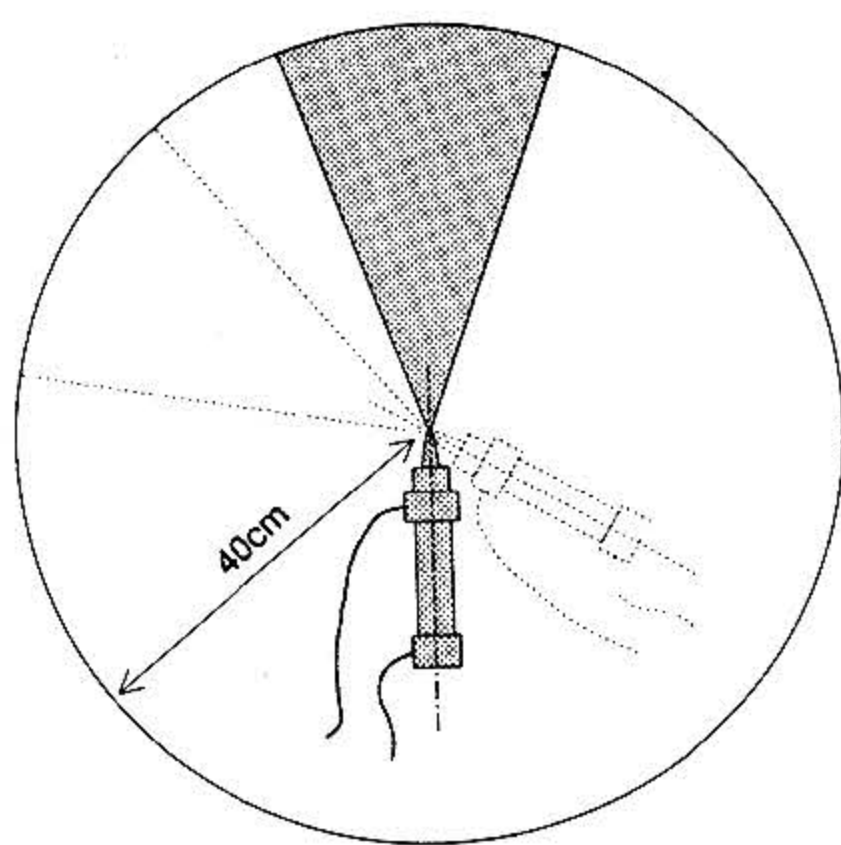


図3 水中のアブレイシブウォータージェット噴流による
損傷可能範囲

Fig. 3 Dangerous zone by underwater abrasive
water jet

超高压水圧力 Pressure: 2,000kg/cm²

超高压水量 Flow rate: 11.0l/min

アブレイシブ供給量 Abrasive supply rate: 1.0
kg/min

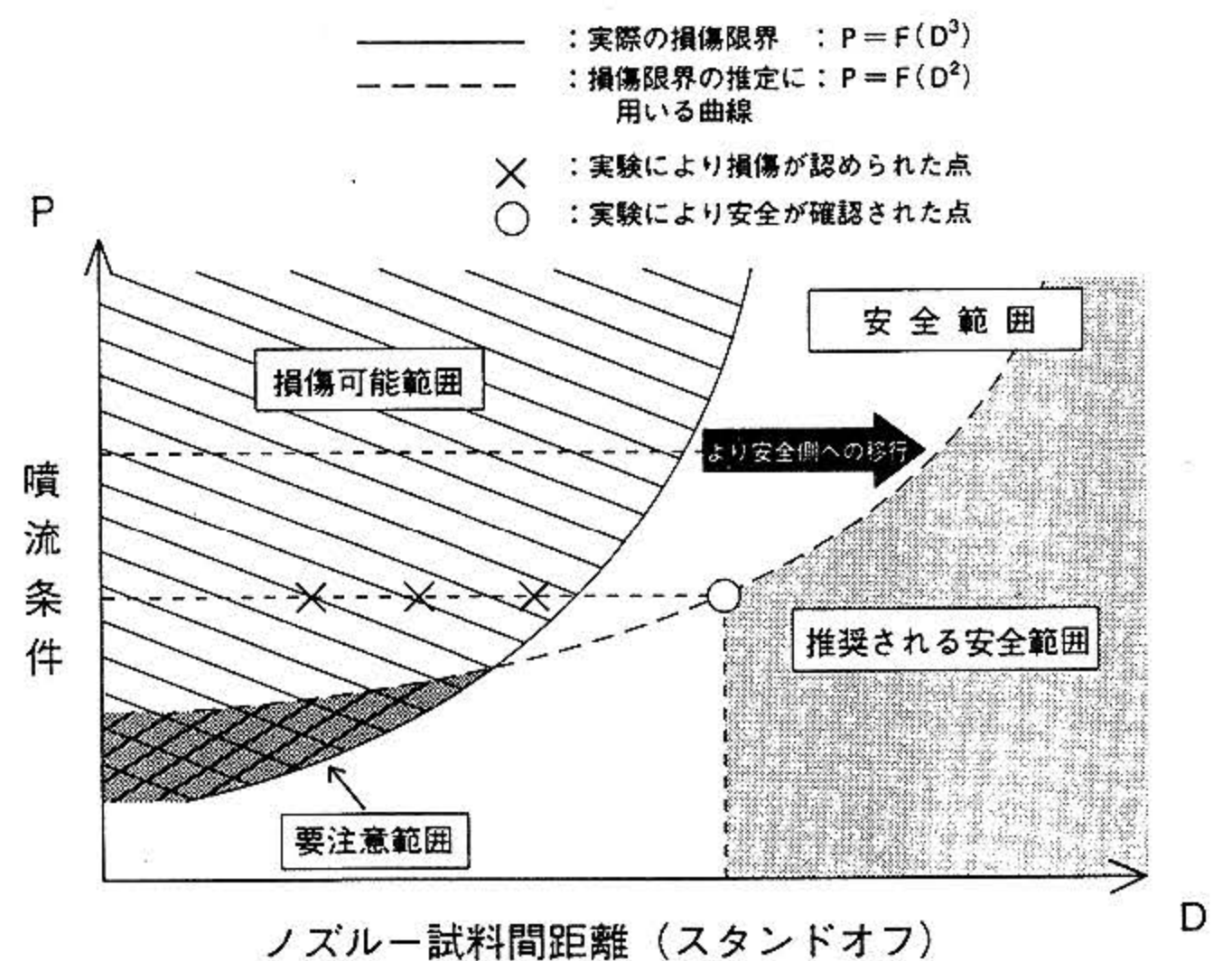


図4 損傷可能範囲の推定と推奨される安全範囲

Fig. 4 Estimated and recommended safety zone.

圧力が倍になっても同程度のエネルギーは2.3倍の距離
までは到達しないことから、今回の試験圧力である

2,000kg/cm² が4,000kg/cm² になっても損傷可能範囲を40cm×2.3=92cm≒1mと考えておけば十分安全と考えられる。

注意すべきは噴流エネルギーが今回の条件より小さく設定された場合であり、換算された損傷可能範囲が実際より小さめになる。即ち吐出圧力が半分になっても損傷可能範囲は1/2.3の距離とはならず、1/2又は1/1.5程度になることが見込まれる。よって実用上は最低監視範囲を半径40cm程度とし、より大きな噴流エネルギーを投与する場合は常時安全側に出る上記のような換算を用いるのが良いと考えられる。

一方、直接の噴流条件ではないが、切断深度も切断能力に大きく影響する。しかし、この場合は深度が増大するとともにキャビテーションの抑制がより大きくなり、噴流と周囲の海水との間の剪断抵抗が増すため、切断能力は低下することが判っている。よって、今回の水深1.3mにおけるデータを深度に係わらず用いれば安全側の損傷可能範囲の設定ができると考えられる。

以上のように損傷可能範囲の概ねの推定は可能となったが、安全確保のための空間分離の原則に立ち戻って基本的安全対策を考えると、水中カメラによる監視の他に損傷可能範囲を予め金網などで覆っておくことも確実に安価な手段として有効と思われる。

5 まとめ

水中でアブレーションウォータージェット式切断を行う場合の安全確保を目的として、水中の噴流による直接損傷可能範囲を把握する実験を行った。

試験片としてはウェットスーツ、ドライスーツ及び潜水呼吸用給気ホースを用いた。

噴流の試験片への照射時間は10秒とし、スタンドオフをパラメータとして損傷状況を観察した。

今回の噴流条件では損傷可能なスタンドオフはいずれの試験片でも40cm以下とすることができ、危険検出および空間分離による安全対策の見地から有用な資料を得た。

さらに噴流条件の異なる場合についても、既存の資料からの簡易計算で安全側の損傷可能範囲を算出できるとした。

6 おわりに

水中でのアブレーションウォータージェット噴流による

直接損傷については損傷状況および損傷可能範囲を把握し、実用的安全対策を講ずるための十分な資料を得ることが出来た。

しかしながら当該装置を水中で使用する場合は音響(振動)による間接損傷を忘れてはならない。これは直接損傷可能範囲外に退避したダイバーの聴覚機能に重大な影響を及ぼす可能性があるためであり、本稿資料と併せ安全対策を完補するために今後の検討を要する課題である。

参考文献

- 1) Cardner, A.W. (1966), Transactions of the Society of Occupational Medicine, vol. 16, p30.
- 2) Kon, M. and Sagi, A., (1985), High pressure water jet injury to the hand. J. Hand Surg., vol. 19 a, pp 412-414.
- 3) Ramos, H., Posch, J.L. and Lie, K.K., (1970), High pressure injection injuries of the hand, Plast. Reconstr. Surg., vol. 45, pp 221-226.
- 4) Higson, R.A. and Figge, F.H.J., A Survey of the Development of Jet Injection in Parenteral Therapy. Current Researches in Anesthesia and Analgesia. vol. 31, no. 6, pp 361-366.
- 5) Neill, R.W.K. and George, B., Penetrating Inter-abdominal Injury Caused by High Pressure Waterjet. Brit. Med. J., vol. 2, 1969, pp. 357-358.
- 6) アブレーションウォータージェット機の安全対策に関する調査研究報告書, 中央労働災害防止協会, 1991.
- 7) アブレーションウォータージェット式水中切断装置の開発, 出村憲二・山口仁士: 海洋科学技術センター試験研究報告, No. 30, Sep. 1993, pp. 61-72.
- 8) ウォータージェット技術事典, 日本ウォータージェット学会編 (丸善株式会社), Nov, 1993, pp. 105-112.
- 9) アブレーションウォータージェットによる式水中切断の基本特性, 山口仁士・出村憲二: 海洋科学技術センター試験研究報告, No. 29, Mar. 1993, pp. 87-99.

(原稿受理: 1994年7月14日)