

2,000 m 潜水調査船 “しんかい 2,000” の 視窓の衝撃試験

高川 真一*¹ 徳永 三伍*¹ 赤坂 健二*²
東口 洋一*³

既報では潜水調査船用視窓の試作試験で、耐静圧強度は最大潜水深度圧の10倍以上の強度があり、疲労クリープ、熱影響、内圧シール性能共に良好なことを確認したことを報告した。今回、この試験の一環として、視窓の耐衝撃強度を調べた。この研究は米国の Stachiw の論文を基に、実機規模の試作視窓で実験を行った。その結果、耐衝撃強度は約 110 ~ 120 kg · m の間であることがわかり、Stachiw の方法による推定値とは、かなり近いことがわかった。なお、この値は 2 kt の速力で質量約 2 t の流木と衝突したときの状況に相当する。その結果、本視窓は十分な強度を有することが確認できた。

Point-Impact-Loading Test for the View-Port of the 2,000m Deep Submergence Research Vehicle “SHINKAI 2000”

Shinichi Takagawa*⁴, Sango Tokunaga*⁴,
Kenji Akasaka*⁵, Yoichi Tohyuchi*⁶

It has been confirmed and reported in a former study on the view-port strength of the deep submergence research vehicle, “SHINKAI 2000” that it possesses short-term-critical-pressure of more than ten times the operational depth, good performance against fatigue, creep, heat, and sealing for back pressure.

This time, the strengths against the point-impact-loading were studied. The experiments were carried out using a full-scale model of the view-port on the basis of Dr. Stachiw's report.

These experiments showed that the strength of the point-impact-loading of these view-ports was about 110 – 120 kg·m and very close to the estimated value of Stachiw's method.

This value is equivalent to the collision energy of a 2-ton-object at 2 knots.

*1 深海開発技術部

*2 三菱重工業株式会社 神戸工場

*3 三菱重工業株式会社 高砂研究所

*4 Deep Sea Technology Department

*5 Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Kobe Shipyard

*6 Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Takasago Technical Institute

1. ま え が き

現在、海洋科学技術センターで昭和56年（1981年）完成をめざして開発建造を進めている2,000 m潜水調査船“しんかい2000”には、耐圧殻に視窓が3個とりつけられる。

この視窓の強度は昭和53年度に行った試作試験では、静圧強度、疲労強度、クリープ、熱影響および内圧シール性能は、いずれも良好であることを確認した¹⁾。しかし、耐衝撃強度について、既存データに対する尺度影響についてふれた報告が見当らなかったため、十分に把握できなかった。そこで今回は新たに入手した米国のStachiwの報告²⁾を基に、尺度影響を十分に検討した上で、実機規模の試作視窓の耐衝撃試験を実施した。

2. 既存データの整理と衝撃強度の推定

視窓の衝撃強度に関するデータはきわめて少いので、合理的な整理をすることはかなり困難であるが、ここでは既存データとしてSchwartz^{3,4)}がDSRV潜水艦救難艦, Deep Submargence Rescue Vehicleの視窓について行ったデータを用い、Stachiwの整理方法²⁾で衝撃強度を推定することとした。

衝撃強度を求める実験は、図1に示すように、視窓コーミングに取付けた円錐台形視窓の中央に、所定の高さから重錘を落下し、視窓が破壊したときの重錘の落下エネルギーをもって衝撃エネルギーとした。

2.1 破壊の定義

重錘を視窓に衝突させた場合、そのエネルギーの大小によっていろいろな形態の破損が生ずる。エネルギーが小さければ、視窓はなんら影響を受けないが、大きくなるにつれて、へこんだり、剥離したり、ひび割れしたり、または完全に割れたりする。

これらの破損は、いずれも視窓を新しいものと取替えなければならないので、データを整理する上での破壊の定義として、どの破損状態を選んでもよい。Stachiwの破壊の定義は、“破壊によって視窓にシール能力が失なわれること”としている。これは写真1に示すように、亀裂、または破

面が外面から内面にかけて貫通した状態をいうものである。この定義によれば、表面の剥離や、表面、内面または内部にクラック等が発生した程度は破壊と認めないことになる。この程度の破壊では、視窓の圧壊圧力にはほとんど影響がなく、むしろ水密性の欠如によって耐圧殻内に浸水することの方がより重大だとしている。

そこで、今回の実験でも、破壊の定義として、この定義を採用することにした。

2.2 既存データと法則性

Stachiwは、Schwartzのデータをいろいろ検討した上で、 $\theta = 90^\circ$ 一定とし、 $t/D = 0.5$ の場合、 $d/D = 1/4$ のデータを調べた結果、衝撃エネルギー強度 KE と D とは両対数グラフ上で直線で表わされることを見出した。

参考となるSchwartzのデータは3点しかないが、この3点は図2に示すように、直線Aにきれいにのっていることがわかる。

そこで他のデータについても、同様の整理を試みたところ、 $\theta = 90^\circ$, $t/D = 0.5$, $d/D = 1/2$ について2点得られ、この2点を通る直線Bは直線Aにはほぼ平行であることがわかった。

このことから窓の衝撃強度は、“ $\theta = 90^\circ$, $t/D = 0.5$, $d/D = k$ (一定)の場合には、 KE と D とは $KE = A(k) D^n$ (n : 一定値)と表わされる”という法則性が推定される。

しかし、この法則では t/D が異なる場合に適用できないので、さらに拡張し、次のような法則性を仮定した。すなわち、“重錘衝突面も含めた幾何形状が相似であれば、 KE と θ とは $KE \sim D^n$ と表わされる”，または、“ $\theta = 90^\circ$, $t/D = k_1$, $d/D = k_2$ の場合、 $KE = A(k_1, k_2) D^n$ が成り立つ”という法則性である。

この法則に立脚すれば、幾何形状による $A(k_1, k_2)$ がわかれば KE が求まる。

Schwartzは、 $D = 2$ inchの視窓縮尺模型で、 $d/D = 1/4$ とし、 $D/t = 1/k_1 = 1, 1.5$ および2の3点の KE のデータを示している。Stachiwはこのデータについて、一次回帰があるとしてグラフを示している(図3参照)。この場合、相関係数は0.999となり、かなり直線性が良い。

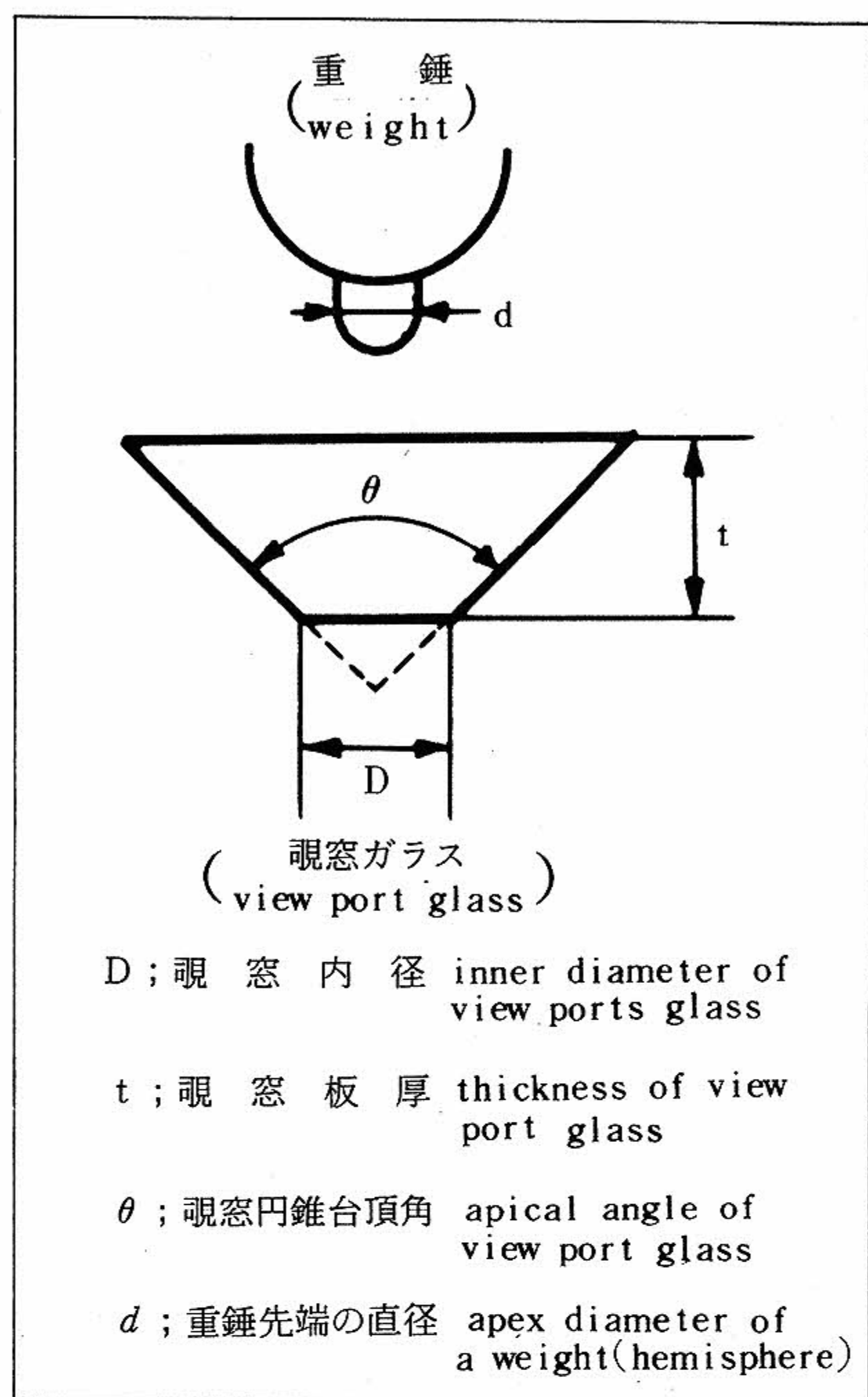


図 1. 衝撃強度試験
Impulse loading test

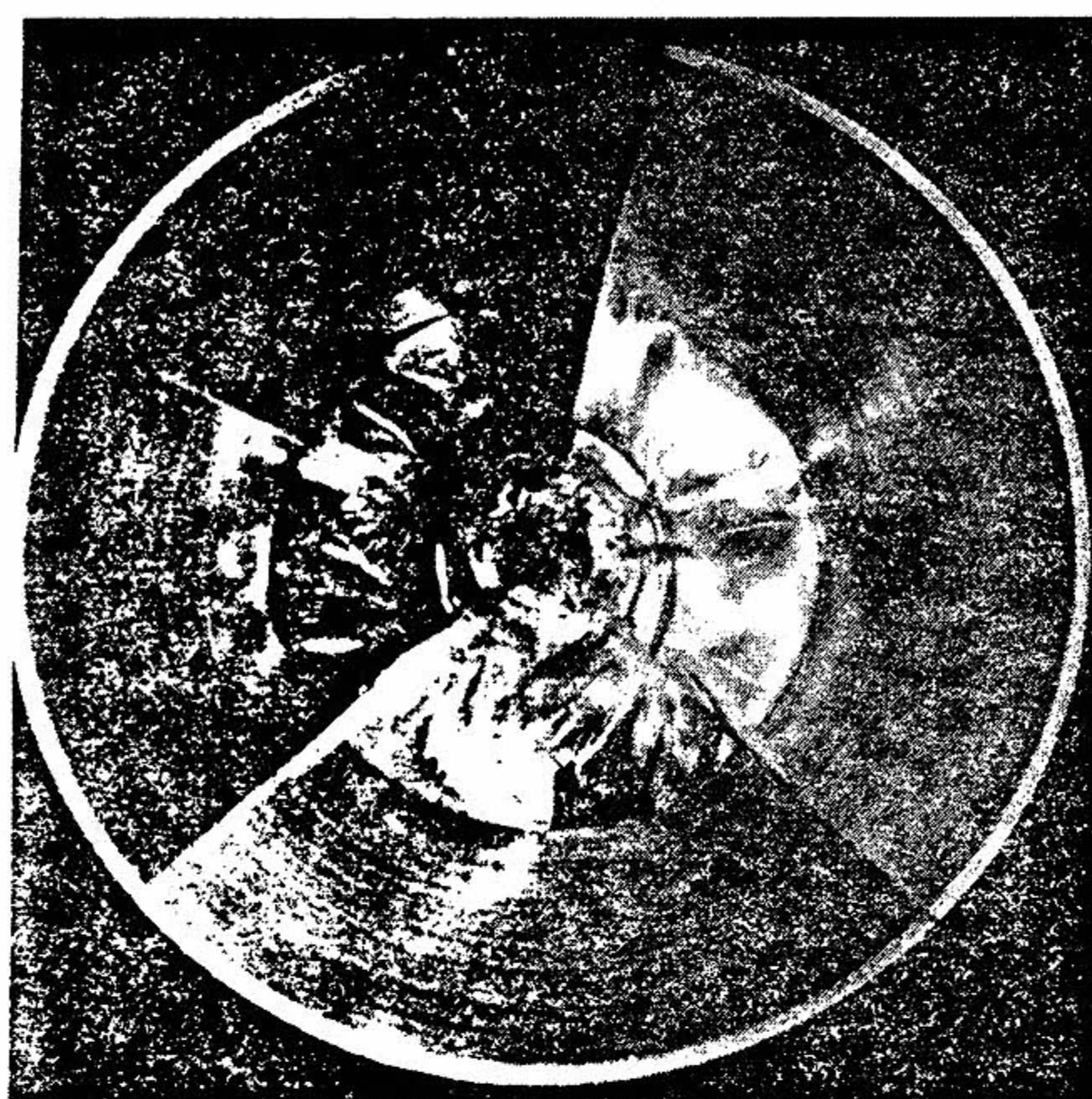
しかし、本研究では図 4 に示すように、指数回帰式を採用した。

この理由は、相関係数が 0.99996 きわめて直線性が良いことのほか、 KE が図 2 および図 4 共に、対数で表わすことができ、 $\theta = 90^\circ$ の任意の大きさの視窓の衝撃強度が、複雑な計算をせずに作図で求めることができるからである。

このようにして、 $D = 2 \text{ inch}$, $d/D = 1/4$ について、 KE と D/t の関係が得られた。また、Schwartz は d/D の実験データも示している。

d/D と KE との関係では、 $d/D < 0.5$ は d/D が小さいほど KE が小さくなる。すなわち、重錘の先端が尖ってくるほどわずかの衝撃で破壊する傾向²⁾がある。しかし、明瞭な相関性は Schwartz のデータからは見出せなかった。

2.3 実機の衝撃強度の推定



投下物の半径 projectile radius = 0.375 inch (0.95 cm)
 投下物の重さ projectile weight = 50 pounds (22.7 kg)
 圧 力 pressure = 0 pound per square inch (0 MPa)
 落下速度 critical velocity = 6.6 feet per second
 (2 m/sec)

写真 1. 代表的な衝撃破損状況
Typical impulse fracture mode

以上の Schwartz のデータの解析、検討によって、 $\theta = 90^\circ$ の任意の大きさの視窓に対し、任意の先端直径の重錘による衝撃強度 KE の推定はできないが、少なくとも $d/D = 1/4$ の場合については推定できるようになった。この推定方法を以下に示す。

“しんかい 2,000” に装備される視窓は図 5 に示すように、 $\theta = 90^\circ$ の円錐台形で、内径が 128mm、板厚が 90mm である。したがって重錘の先端直径は 32mm としなければならない。

この視窓の D/t は 1.4222 であるので、図 4 から $D/t = 1.4222$ の KE を求めると、 $KE = 13.75 \text{ kg-m}$ (99.42 ft-lb) という値が得られる。この値は実機と形状が相似で $D = 50.8 \text{ mm } \phi$ (2 inch) のものの衝撃強度である。したがって図 2 で $D = 50.8 \text{ mm}$ (2 inch), $KE = 13.75 \text{ kg-m}$ (99.42 ft-lb) という点を通り、直線 A に平行な直線を引き、 $D = 128$

mm (5.04 inch) に対する K_E を求めれば、この値が実機に対する $d/D = 1/4$ の場合の衝撃強度の推定値である。このようにして、図 6 から実機の衝撃強度を推定すると、 $K_E = 128.4 \text{ kg}\cdot\text{m}$ (928.7 ft-ℓb) が得られる。

3. 実験

以上の検討および推定に基づき、図 7 に示すような実験装置で衝撃試験を行った。

重錘は重量70kgで、先端部の直径 d は $d/D = 1/4$ を満たすように $d = 32 \text{ mm } \phi$ とした。

実験方法は、重錘の落下高さを調整して衝撃エネルギーを次第に大きくし、供試視窓が “2.1 破壊の定義” で述べた破壊様相を示すときの衝撃エネルギー値を求めるものである。

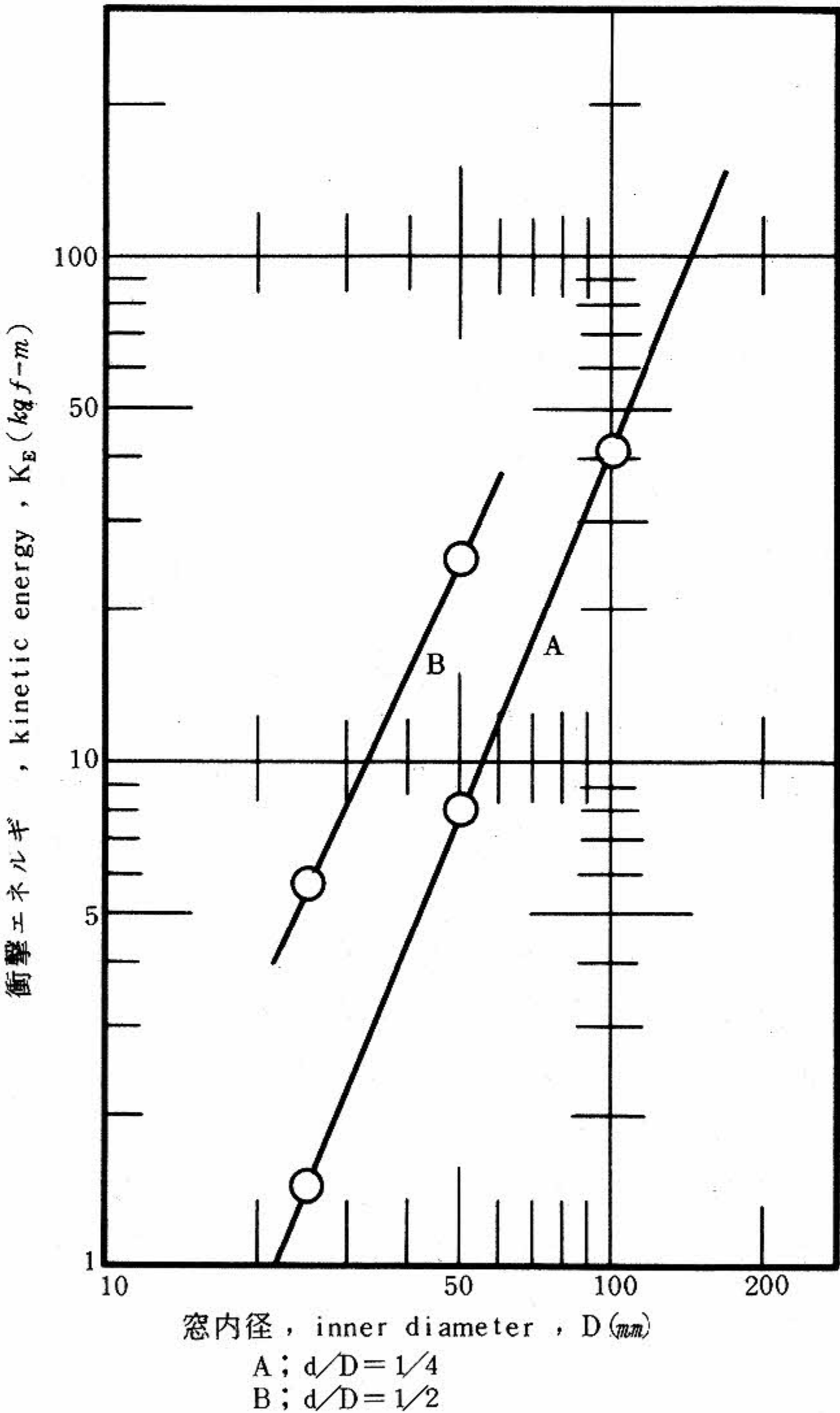
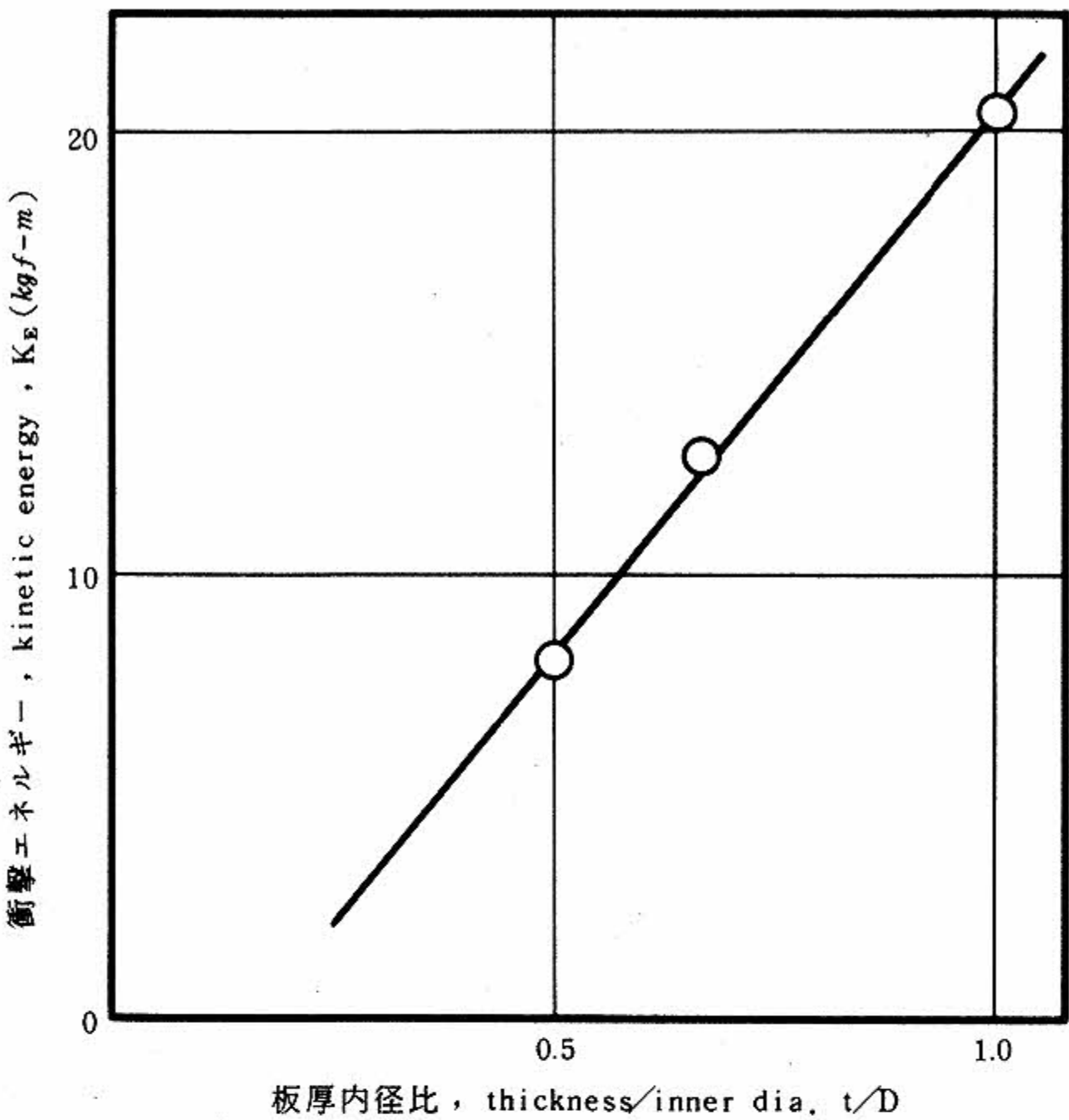


図 2. 窓内径と衝撃エネルギー
Kinetic energy and inner diameter of view port



$$K_E = -4.1 + 24.65 \, t/D$$

$$r = 0.9988$$

データ, data; Schwartz³⁾, $\theta = 90^\circ$, $D = 2 \text{ inch}$, $d = 0.5 \text{ inch}$

図 3. 板厚内径比と衝撃エネルギー
(その 1) (一次回帰)

t/D and kinetic energy, I
(linear correlation)

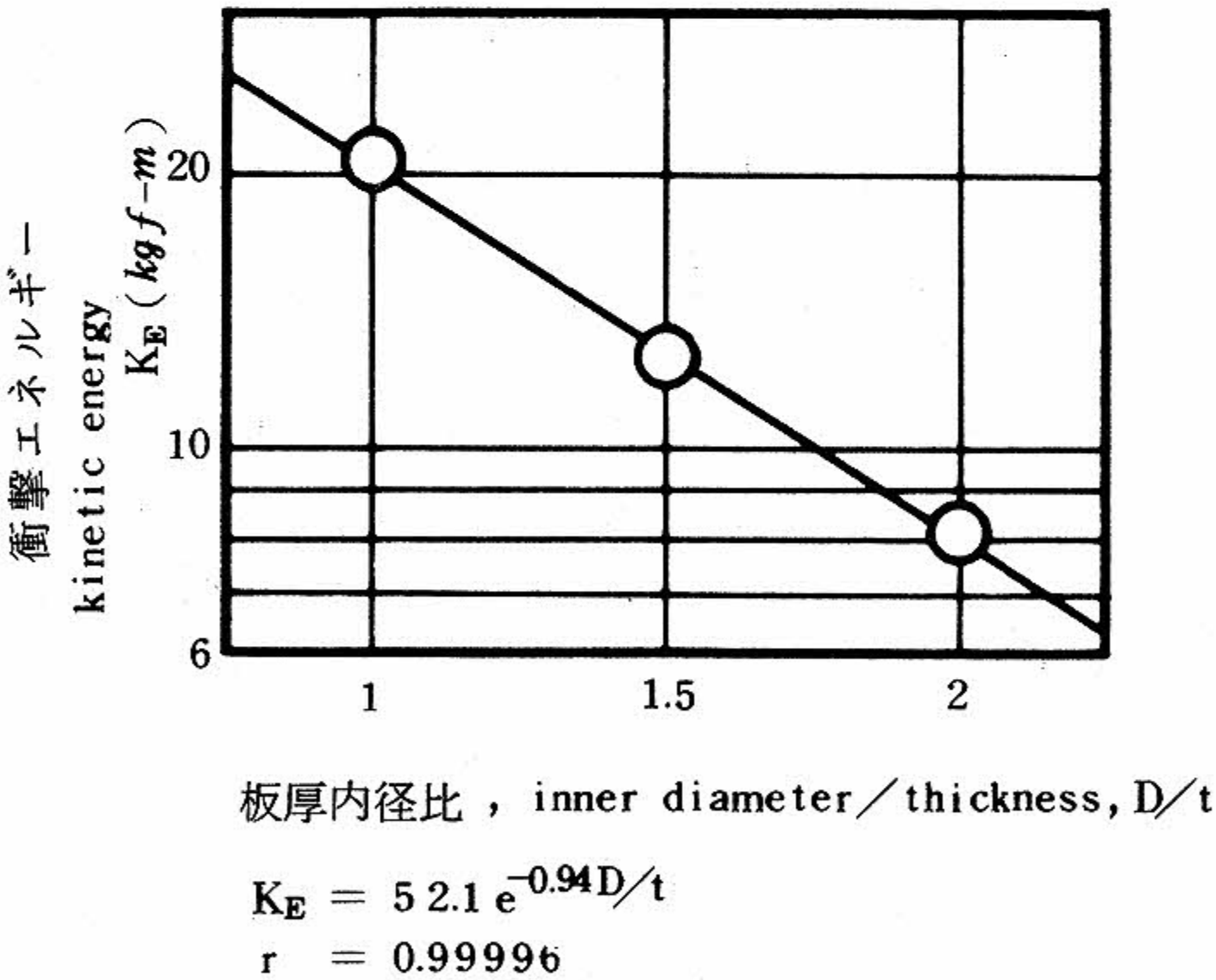


図 4. 板厚内径比と衝撃エネルギー
(その 2) (指数回帰)

D/t and kinetic energy, II
(exponential correlation)

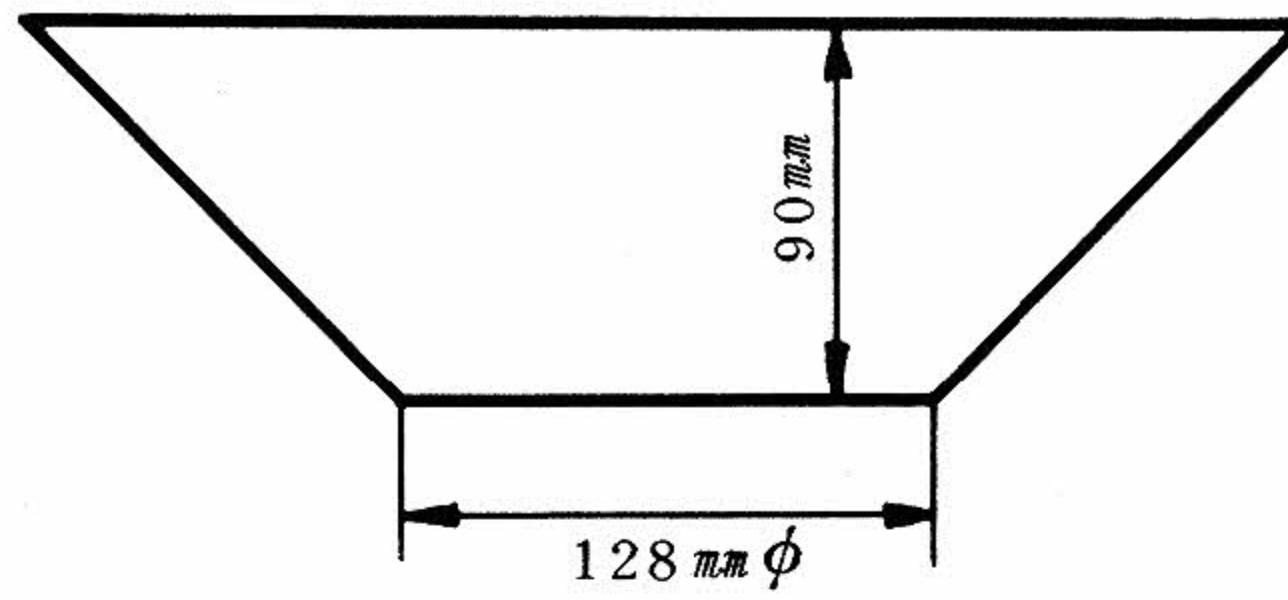
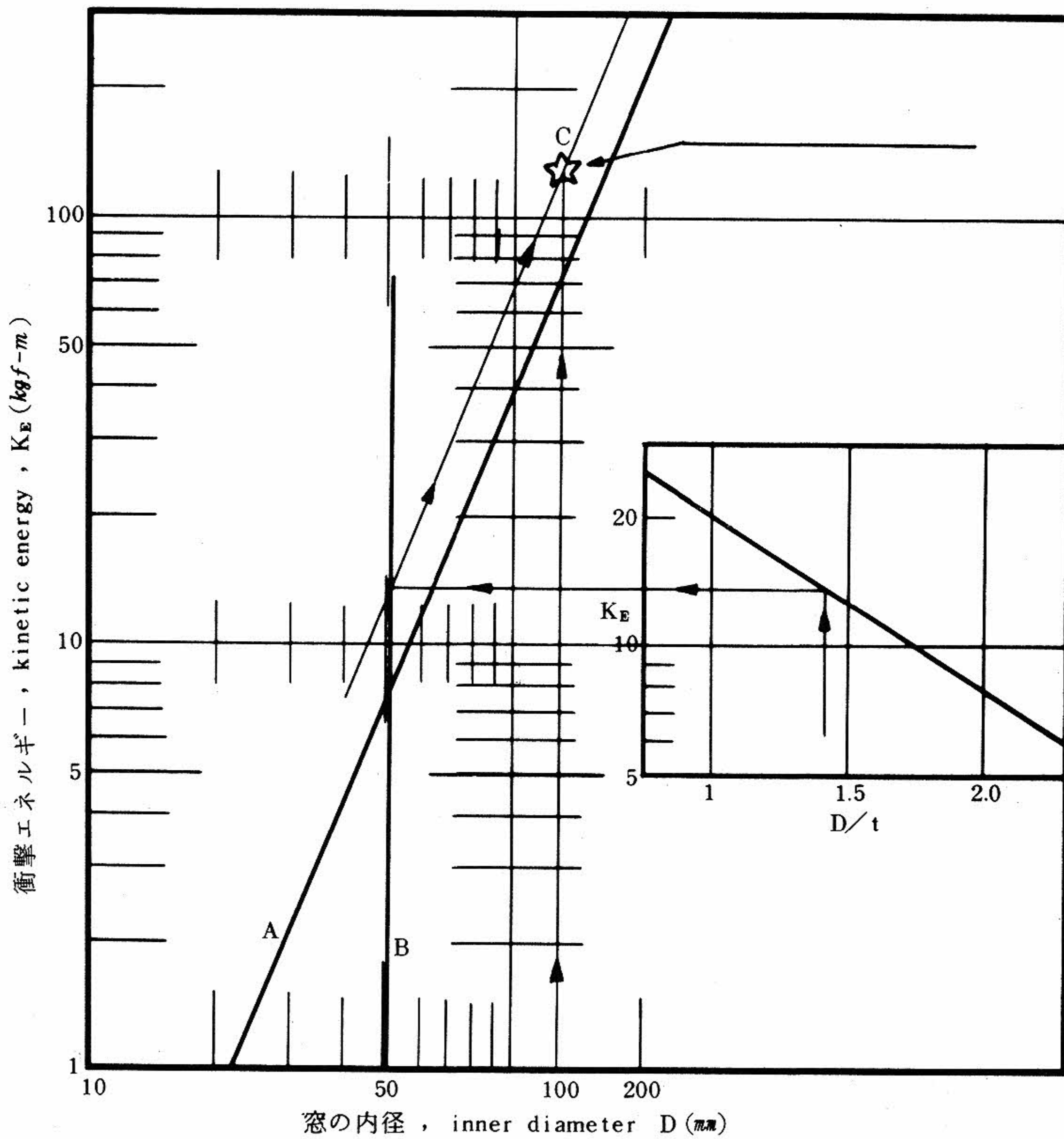


図5. 「しんかい 2,000」用視窓
View port for "SHINKAI 2000"



- A... stachiwの直線 , stachiw's line
B... 2 inch 厚の窓 , 2 inch basic window
C... 推定された破壊点 , fracture estimation point

図6. 衝撃強度の図的推定法
Graphical estimation method for impulse strength

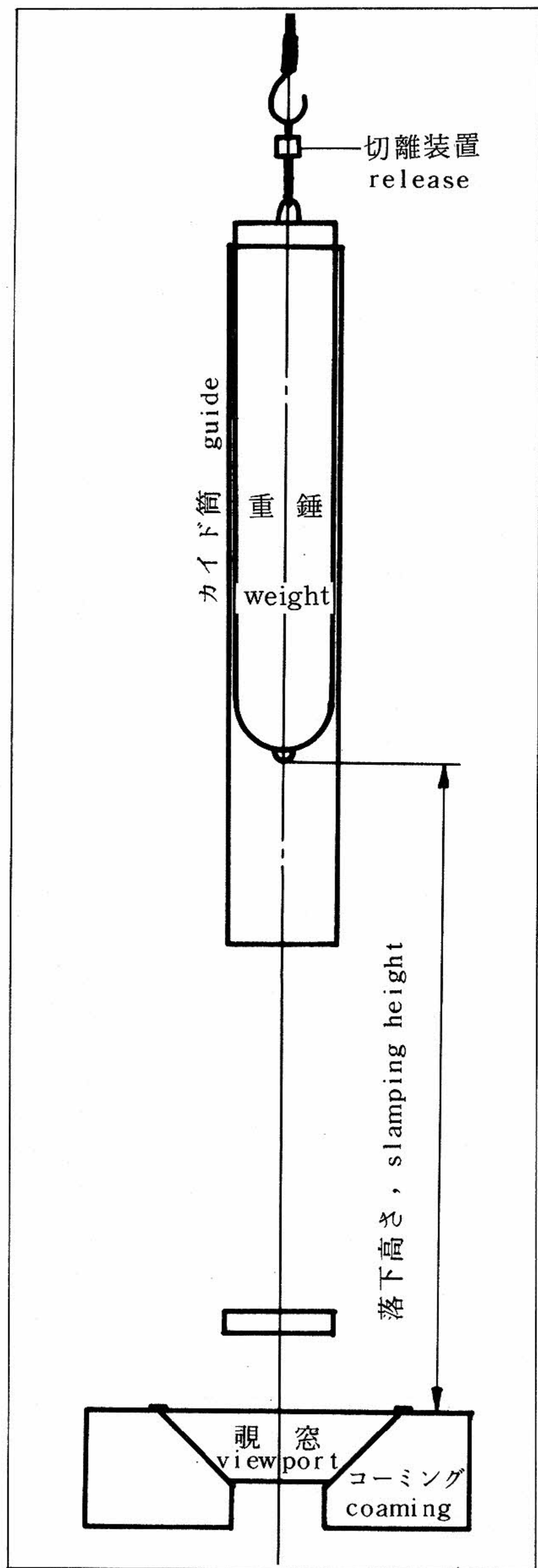
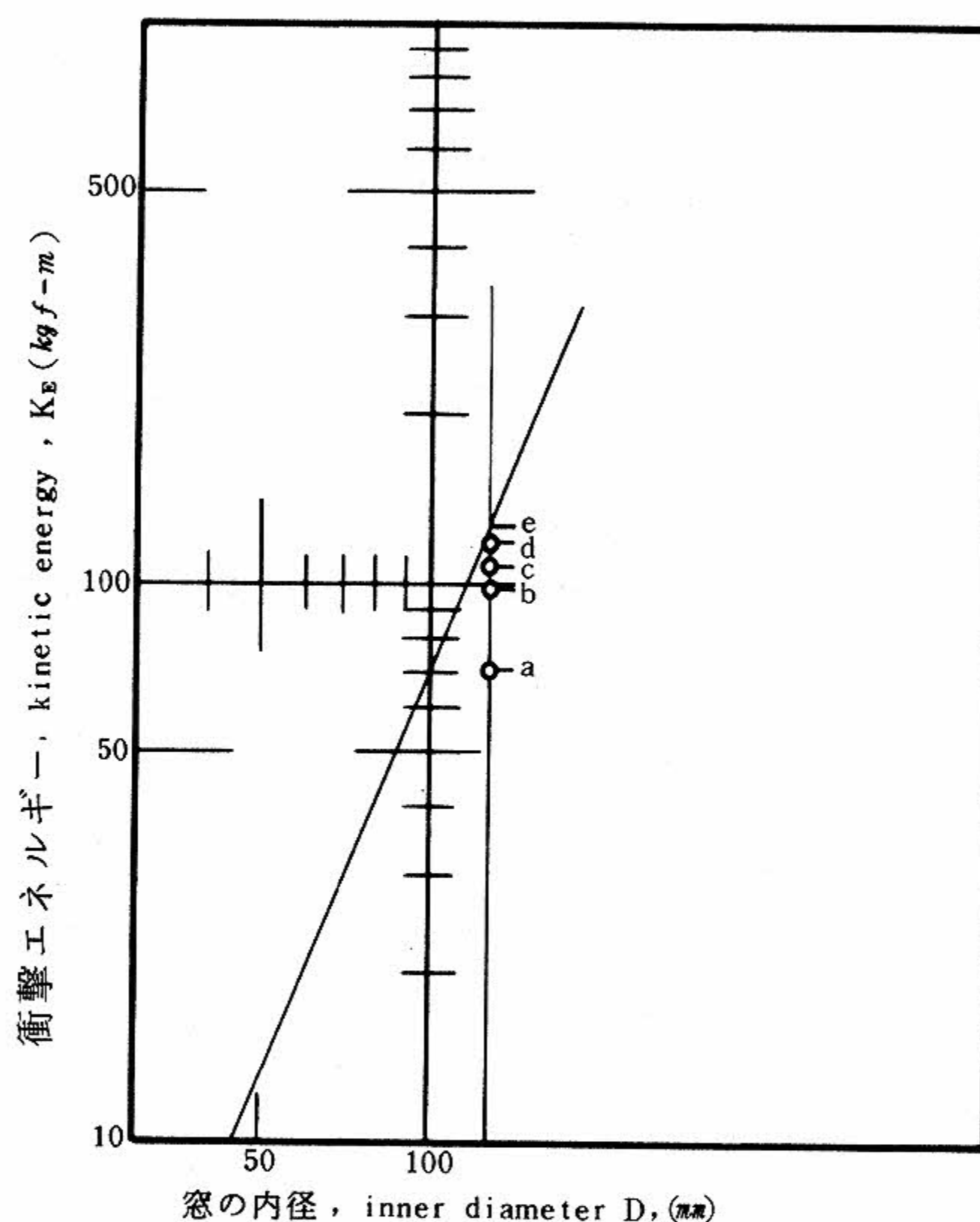


図7. 実験装置
Test equipment

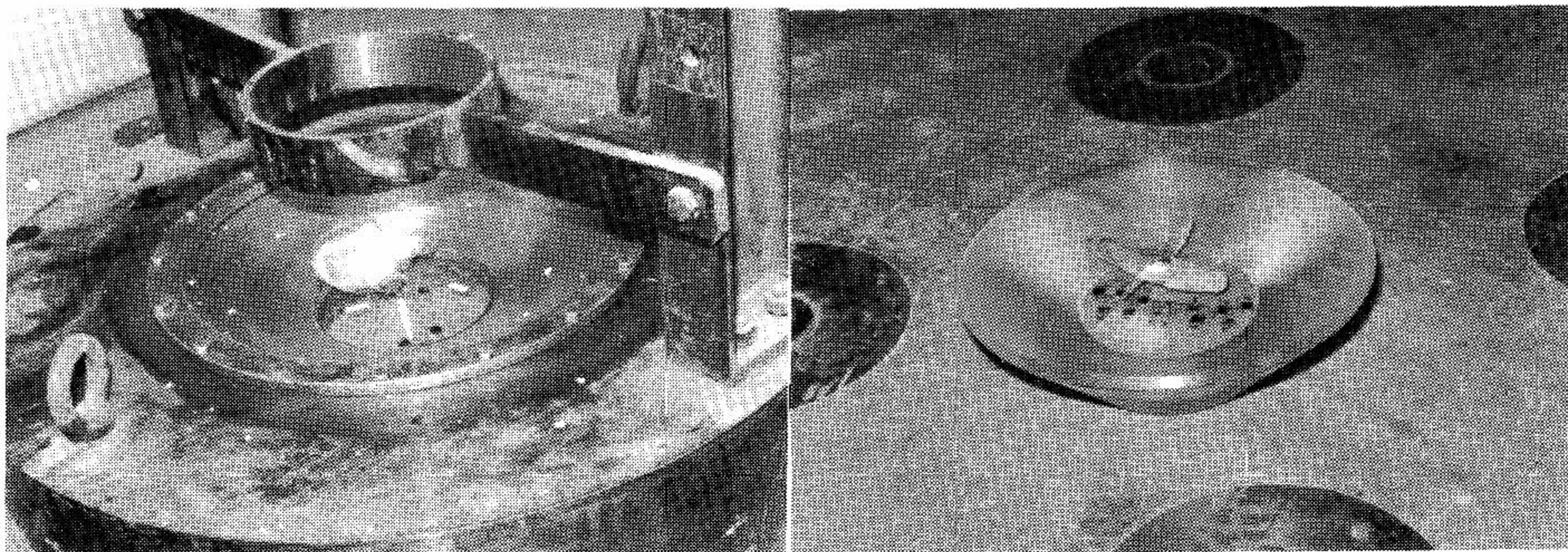
実験で与えた衝撃エネルギー値と破壊様相を写真2に示し、また前節の推定値との比較を図8に示す。

この実験の結果、“2.1 破壊の定義”で述べた破壊が生ずる限界の衝撃エネルギーを求めることは、供試品の数が限られているのでできなかったが、約110～120 kg-mの間にあることがわかり、この値は図8からわかるように推定値にかなり近いといえる。



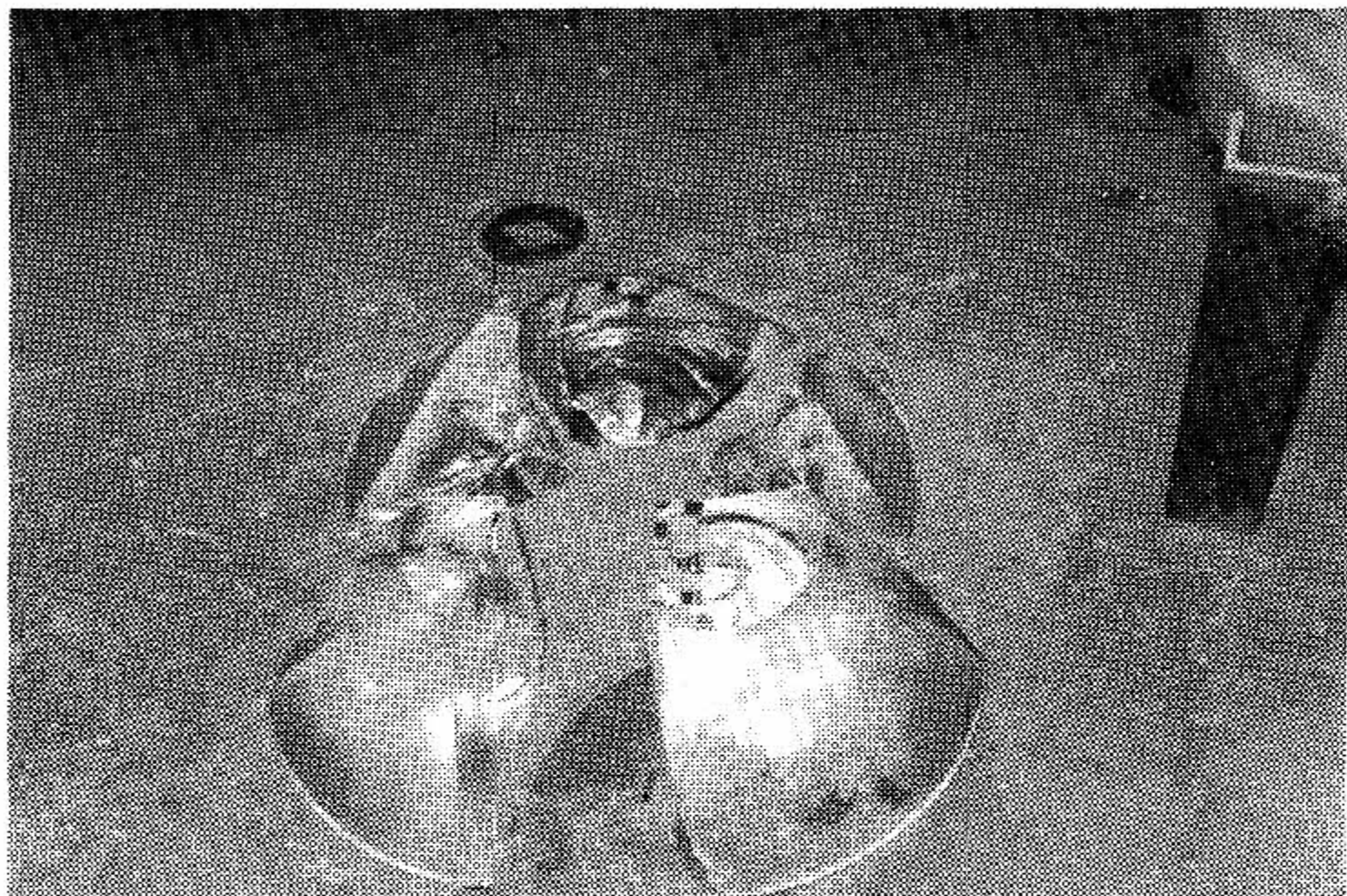
a	表面剝離	surface pool off	70kg-m
b	破面発生, 貫通せず,	crack developed, but not passed through,	98kg-m
c	破面発生	crack	108.5kg-m
d	破壊	fracture	119kg-m
e	予想値	estimation	128.4kg-m

図8. 実験結果と推定値の比較
Comparison between test results and estimation



(1)

(2)



(3)

写真	衝撃エネルギー impluse energy	破 損 状 況 states of fracture
(1)	$70 \text{ kg} \cdot m (= 70 \text{ kg} \times 1 m)$	表面に深さ約 9 mm , 半径約 50 mm の扇型の剥離発生 The surface peeled a fan form (depth 9 mm , dia. 50 mm)
(2)	$98 \text{ kg} \cdot m (= 70 \text{ kg} \times 1.4 m)$	十文字に破面発生, 破面直径約 100 mm , 深さ約 $75 \sim 80 \text{ mm}$ Crack (depth $75 \sim 80 \text{ mm}$, dia. 100 mm)
—	$108.5 \text{ kg} \cdot m (= 70 \text{ kg} \times 1.55 m)$	表面剥離, 破面発生, 破面深さ約 80 mm Surface peel off, crack
(3)	$119 \text{ kg} \cdot m (= 70 \text{ kg} \times 1.7 m)$	完全破壊, 5 分割される Completely fracture

写真 2. 衝撃による視窓ガラスの破損
Impluse fractures of view port glass

4. 実海面との対応

実験で得た衝撃強度 $110 \sim 120 \text{ kg}\cdot\text{m}$ という値は、単にエネルギーという観点のみに立てば、潜水船が 2 kt の速度で質量 2 t の浮遊物体に衝突することに相当する。

この浮遊物体が仮りに流木であるとすれば、この流木は 2 m^3 以上もの大きなものであり、これと衝突することは、まず考えられない。また、一般に流木の端部は腐って柔くなっており、衝突でこの窓を破壊するには、流木がもっと大きなものでなければならない。しかし、大きな流木では潜水船前部のフェンダーに当り、窓には直接当たらないと考えられる。したがって、曳航中の衝突による視窓の破壊は、まず起こり得ないと考えられる。

5. まとめ

以上の実験および検討から、次のようなことがいえる。

- (1) 衝撃試験を実施し、本視窓の衝撃強度が先端直径が 32 mm のものに対して $110 \sim 120 \text{ kgf}\cdot\text{m}$ であることを求めた。
- (2) 既存データを整理し、任意の大きさ、形状（ただし円錐台頂角 90° 、 $d/D = 1/4$ ）の視窓の衝撃強度を推定する方法を導き出した。
- (3) この方法は本実験値とよく一致することを確認した。

(4) 実海域では、本視窓のような強い衝撃強度を有するものでは、衝突によって破壊して耐圧殻内に浸水するような事態は起こり得ないことを見出した。

(5) 昭和53年度実施の諸試作試験結果¹⁾と本実験結果から、本視窓は十分な強度を有することが確認された。

文 献

- 1) 高川真一，坂倉勝海，徳永三伍ほか，1980，“潜水調査船用視窓の試作試験” JAMSTACTR(4) 69 ~ 83
- 2) Stachiw, J. D., 1977, “Acrylic plastic viewports for ocean engineering applications”, Naval Undersea Center TP 562 Vol. I
- 3) Schwartz, F. M., 1969, “The Structural performance of acrylic viewports”, Naval Ship Research and Development Center, Report 3167
- 4) Mecholsky, J. J., and Schwartz, F. M., 1969, “Evaluation of DSRV- 1 acrylic windows under dynamic loading”, Naval Ship Research and Development Center, Letter Serial 69- 720- 687