

アブレーシブウォータージェットによる 水中切断の基本特性

山口 仁士*¹ 富田 慎一*¹

出村 憲二*¹

アブレーシブウォータージェットによる水中切断の基本的特性について、切断能力に関わる基本要素ごとに水中での実験を行い、次の結果を得た。

切断能力は、ウォータージェットの吐出圧力や流量などのポンプ力量にほぼ比例して向上する。

切断効率を向上させるには、スタンドオフの制御精度の向上が効果的である他、アブレーシブの連続大量供給も有力と考えられる。

切断能力は深度の影響を大きく受ける。100m では大気圧状態の約3分の2に減少し、300m では約3分の1となる。

同様なポンプ力量では単位時間あたりの切削量はほぼ一定である。

硬度の低い材料では、アブレーシブの粒度を大きくすることで切断時間を短縮することができる。

キーワード：アブレーシブ、ウォータージェット、水中、没水、切断

A Study on Basic Characteristics of Underwater Cutting by Abrasive Water-Jet

Hitoshi YAMAGUCHI*² Shin-ichi TOMITA*²

Kenji DEMURA*²

In order to find the basic characteristics of underwater cutting by abrasive water-jet, principal parameters were varied in an immersion experiment.

The results were as follows.

Cutting efficiency is almost linearly in proportion to the flow rate and pressure of the water-jet.

In order to improve the efficiency of cutting, it was found that the improvement of control accuracy of stand-off distance and continuous supply of an abrasive were the most effective for cutting efficiency.

* 1 海域開発研究部

* 2 Marine Development Research Department

The cutting efficiency was found to be greatly dependent on environmental water pressure in case of immersion. At a depth of 100m, cutting efficiency was decreased to around 2/3 and was around 1/3 at 300m depth, each compared to the efficiency found at 0.1m immersion.

The scraping rate of the test plate was almost constant under the given pump capacity, independent of the thickness of the plate.

When the cutting material is not so hard, larger grades of abrasive increased cutting efficiency.

Key words : Abrasive, Water-jet, Under water, Immersion, Cutting

1 はじめに

海洋構造物が全世界的に設置され始めておおむね 20 年が経過しようとしているが、近年はそれら大型海洋構造物の撤去を要する時期に来ており、その方法等について関心が高まって来ている。

構造物の撤去における必須の工程となる切断に関しては、水中の大型構造物の場合は、従来最も多く適用されているのが爆破による切断であり、海洋石油関連施設の撤去例のうち 90% 以上を占めている。その他の数%のうちの一部分が、本試験研究で取り扱ったアブレイシブウォータージェットによる切断によるものである。

それぞれの方法には得失があり、爆破によるものは短工期と低コスト、アブレイシブウォータージェットによる方法は精密で確実な切断及び周囲環境への影響が殆どないことといわれている¹⁾。しかしながらアブレイシブウォータージェットによる水中深々度での切断実績は国内にはなく、また、本技術を国内で再現するための十分な公開資料も海外に見いだすことができない。これは本技術が未だ完成されたものでなく、ようやく広がり始めた時期であることが原因と考えられる。

ここではアブレイシブウォータージェット式水中切断の基本的特性について、切断能力に係わる基本要素ごとに実験を行い、総覧的に明らかにしたので報告する。

2 目 的

アブレイシブウォータージェットによる水中切断能力は、研磨材噴射媒体としての水噴流の圧力

や流量などの種々のパラメータにより変化する²⁾。

ここでは、アブレイシブウォータージェット式水中切断装置のシステム化に必要な基本的パラメータを変化させ、切断能力に及ぼす一般的傾向を把握する。

3 方 法

3.1 変化させたパラメータ

アブレイシブウォータージェット式切断は図 1 に示すように、通常数百気圧から数千気圧に加圧した水を直径 0.1 ミリ程度のウォーターノズルから噴出させ、エジェクターとなる混合室で研磨材を吸引混合し、あわせて超硬金属製のアブレイシブノズルから噴出させる方式により切断対象を切削するものであるが、切断能力を決定する要素としては表 1 に示すものがあげられる。それぞれのパラメータについて設定値を変化させ、表 2 に示す概要の試験を行った。設定値の詳細については表 3 による。

3.2 試験装置

図 2 に示す小型試験水槽を使用して試験を行った。水を充満したタンクにノズルヘッドを固定し、試験片平行送り装置に固定した切断試験片を一定の速度で移動させて試験を行った。ウォータージェットの作動によりタンク内に圧入される水は圧力調整弁を介して系外へ放出され、タンク内の圧力は一定に制御された。

試験の目的に応じ、テストピースは図 3 に示すテーパ板を使用した。

超高压ポンプは 65 馬力のものを使用した。

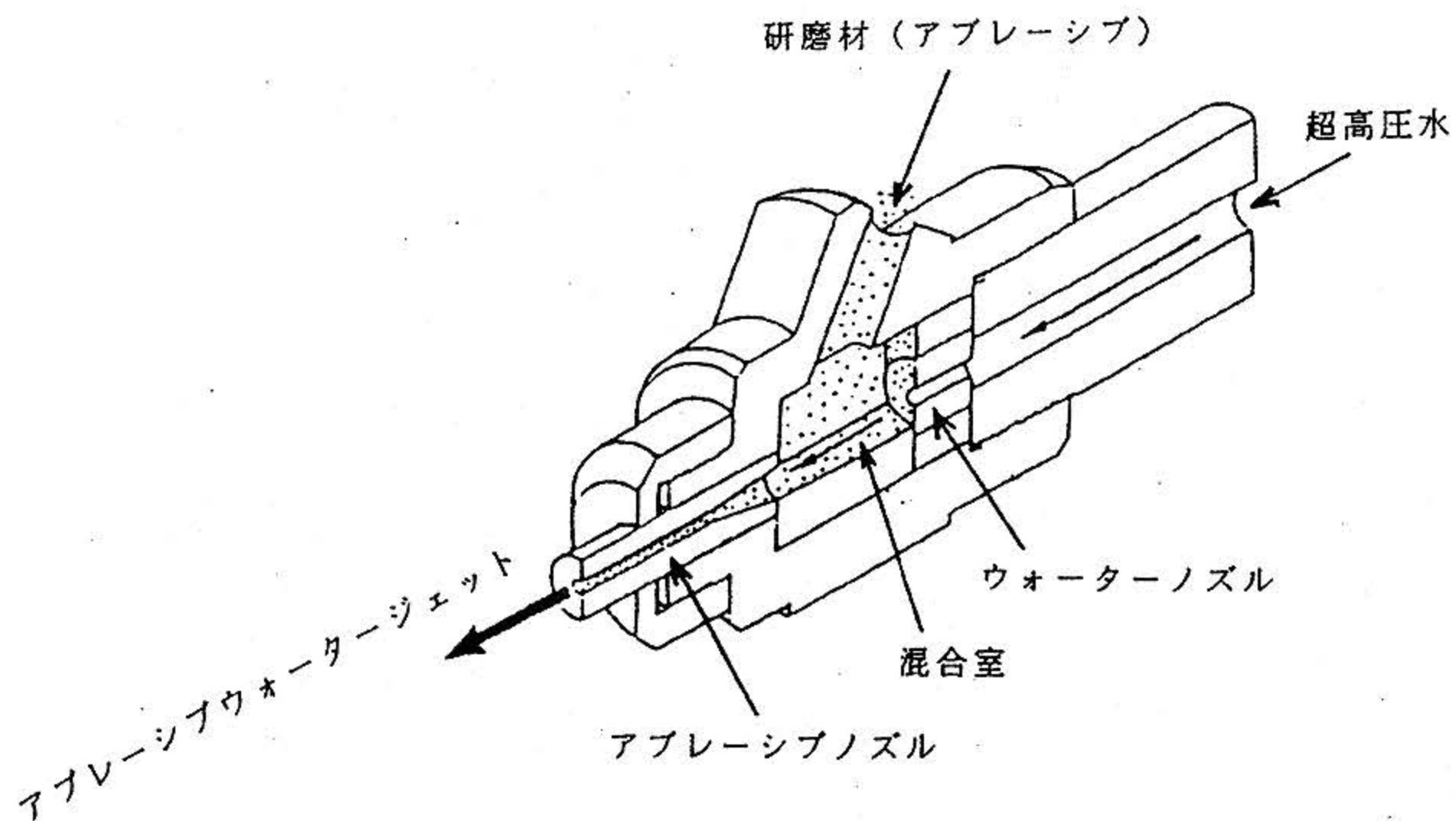


図1 アブレイシブウォータージェットのノズル部概念図
Fig. 1 Schematic diagram of nozzle head of abrasive water jet

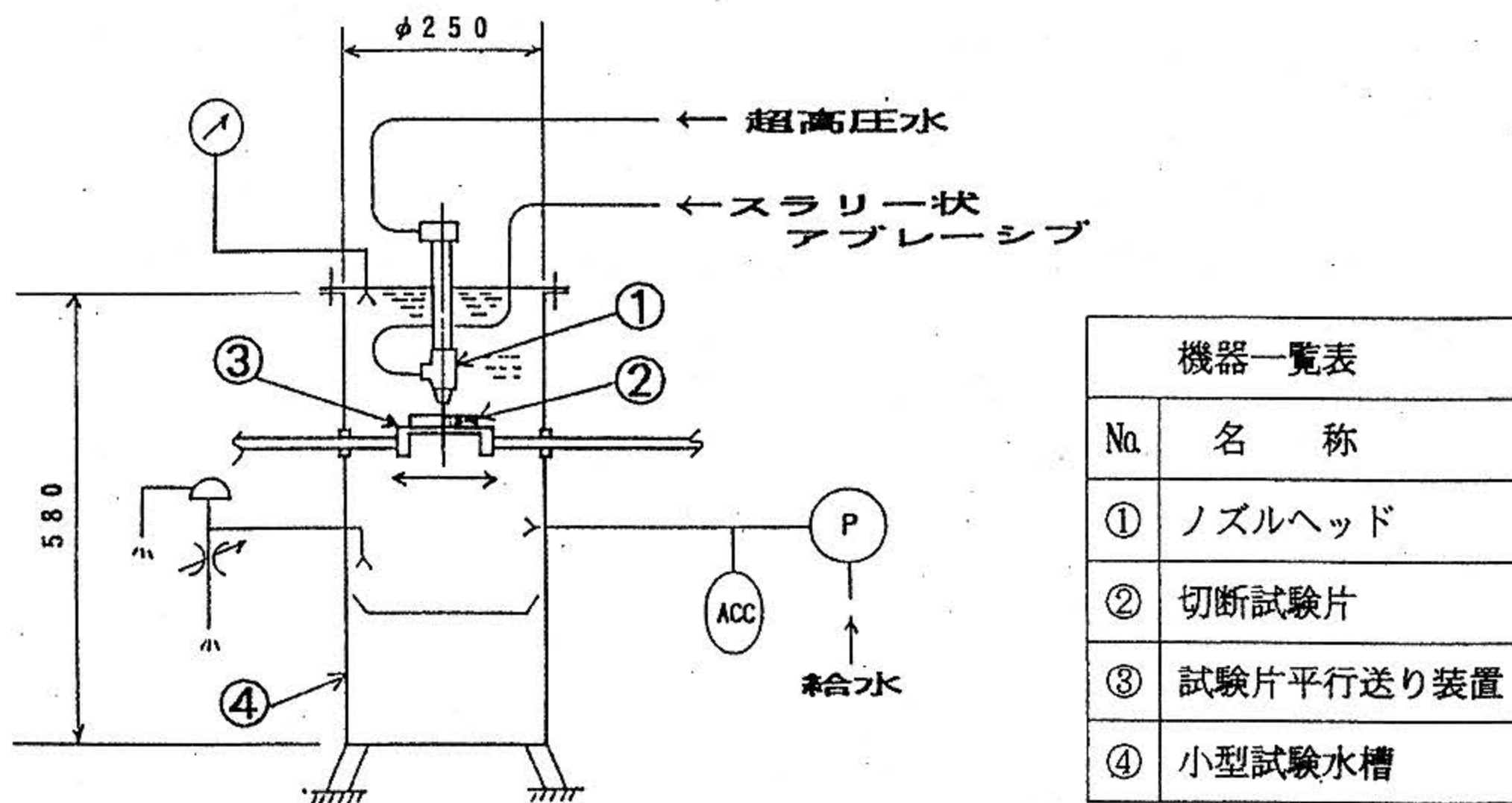


図2 小型試験水槽
Fig. 2 Schematic diagram of test tank

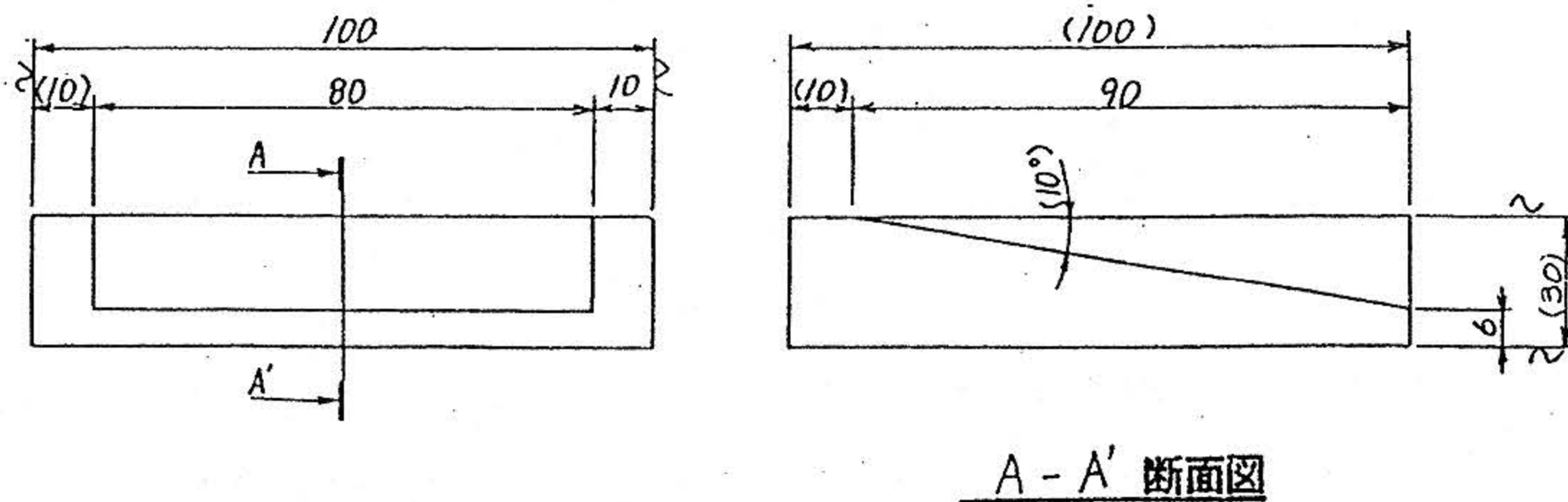


図3 テストピースとして用いたテーパ板
Fig. 3 Taper shaped test plate

表1 切断能力を決定する諸要素
Table 1 Principal parameters of water jet cutting

超高压水	圧力
	流量
研磨材	供給量
	材質
ノズル試料間距離	
	(スタンドオフ)
切断環境	圧力(水中)
試料	材質
	切断速度

表2 アブレイシブウォータージェット式水中切断の基本特性試験概要
Table 2 Parameter variations in the test

番号	試験名称及び変化させたパラメータ	設定値	単位	試験回数
①	圧力影響試験			
	送水圧力	600 1,000 1,500 2,000	kgf/cm ²	4 回
②	流量影響試験			
	送水流量	5.5 8 11	ℓ /min	3 回
③	スタンドオフ影響試験			
	スタンドオフの距離	2 5 10 20 30	mm	5 回
④	環境圧力影響試験			
	深度	空中 0.1 10 100 200 300	m	6 回
⑤	板厚影響試験			
	テストピース厚さ	12 22 50	mm	3 回
⑥	アブレイシブ粒度影響試験			
	粒度	80 100 120	#	3 回
⑦	アブレイシブ供給量影響試験			
	供給量	0.7 1.0 1.3	kg/min	3 回

合計 27 回

表3 試験条件詳細

Table 3 Detailed conditions of parameter variation tests

項 目	単 位	設 定 値												
試 験 名 称	—	(1)圧力影響試験	(2)流量影響試験	(3)スタンドオフ影響試験	(4)環境圧力影響試験	(5)板厚影響試験	(6)アブレーション粒度影響試験	(7)アブレーション供給量影響試験						
試 験 回 数	回	4	3	5	6	3	3	3						
ウォーターノズル径	mm	適宜	適宜	適宜	適宜	適宜	適宜	適宜						
アブレーションノズル径	mm	適宜	適宜	適宜	適宜	適宜	適宜	適宜						
切 断 向 き	—	下向き	下向き	下向き	下向き	下向き	下向き	下向き						
ワ ー ク 材 質	—	SS41	SS41	SS41	SS41	SS41	SS41	SS41						
ワ ー ク 形 状	—	テーパ板	テーパ板	テーパ板	テーパ板	平 板	テーパ板	テーパ板						
ワ ー ク 厚 み	mm	30	30	30	30	12 22 50	30	30						
ノズル移動速度	mm/min	100	150	100	100~150	25~100	100~150	150						
環 境 条 件	水中m	0.1 (常圧水中)	0.1 (常圧水中)	0.1 (常圧水中)	空中 Q1 10 100 200 300	0.1 (常圧水中)	0.1 (常圧水中)	0.1 (常圧水中)						
送 水 圧 力	kg/cm ²	600 1000 1500 2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000						
送 水 流 量	ℓ/min	8	5.5 8 11	8	8	8	8	8						
スタンドオフ距離	mm	5	5	2 5 10 20 30	5	5	5	5						
アブレーション粒度	#	80	80	80	100	100	80 100 120	80						
アブレーション供給量	kg/min	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.7 1.0 1.3						

4 結 果

4.1 圧力影響試験 (図 4)

板厚 30 ミリのテストピース (SS41) をテーパ加工して切断肉厚が連続的に変化する状況を設定し、肉厚の薄いほうから厚いほうへ切断を行い切断可能板厚を「切断深さ」として評価した。

吐出流量を一定に保つため、吐出圧力の設定に応じてウォーターノズルを口径の異なるものに交換した。ウォーターノズルと圧力・流量の関係は表 4 による。

4.2 流量影響試験 (図 5)

板厚 30 ミリのテストピース (SS41) をテーパ加工して切断肉厚が連続的に変化する状況を設定し、肉厚の薄いほうから厚いほうへ切断を行い切断可能板厚を「切断深さ」として評価した。

超高压水の圧力は $2,000\text{kg}/\text{cm}^2$ で一定とし、吐出流量を変化させるためウォーターノズルの口径を変化させた。吐出圧力、ウォーターノズル径及び吐出流量の関係については表 4 による。

4.3 スタンドオフ影響試験 (図 6)

板厚 30 ミリのテストピース (SS41) をテーパ加工して切断肉厚が連続的に変化する状況を設定し、肉厚の薄いほうから厚いほうへ切断を行い切断可能板厚を「切断深さ」として評価した。

切断速度を一定とし、スタンドオフを 5 通りに変化させ試験を行った。

4.4 環境圧力影響試験 (図 7)

板厚 30 ミリのテストピース (SS41) をテーパ加工して切断肉厚が連続的に変化する状況を設定し、肉厚の薄いほうから厚いほうへ切断を行い切断可能板厚を「切断深さ」として評価した。

切断部の没水による影響も評価するため、大気圧下の試験として空中での試験と約 10 センチ没水させた状態での試験を併せ行った。

4.5 板厚影響試験 (図 8)

厚みの異なる平鋼 (SS41) を用いて、常圧水中下で切断速度を変化させ、切り残しのまったく無い完全な切断が得られる切断速度を概査した。

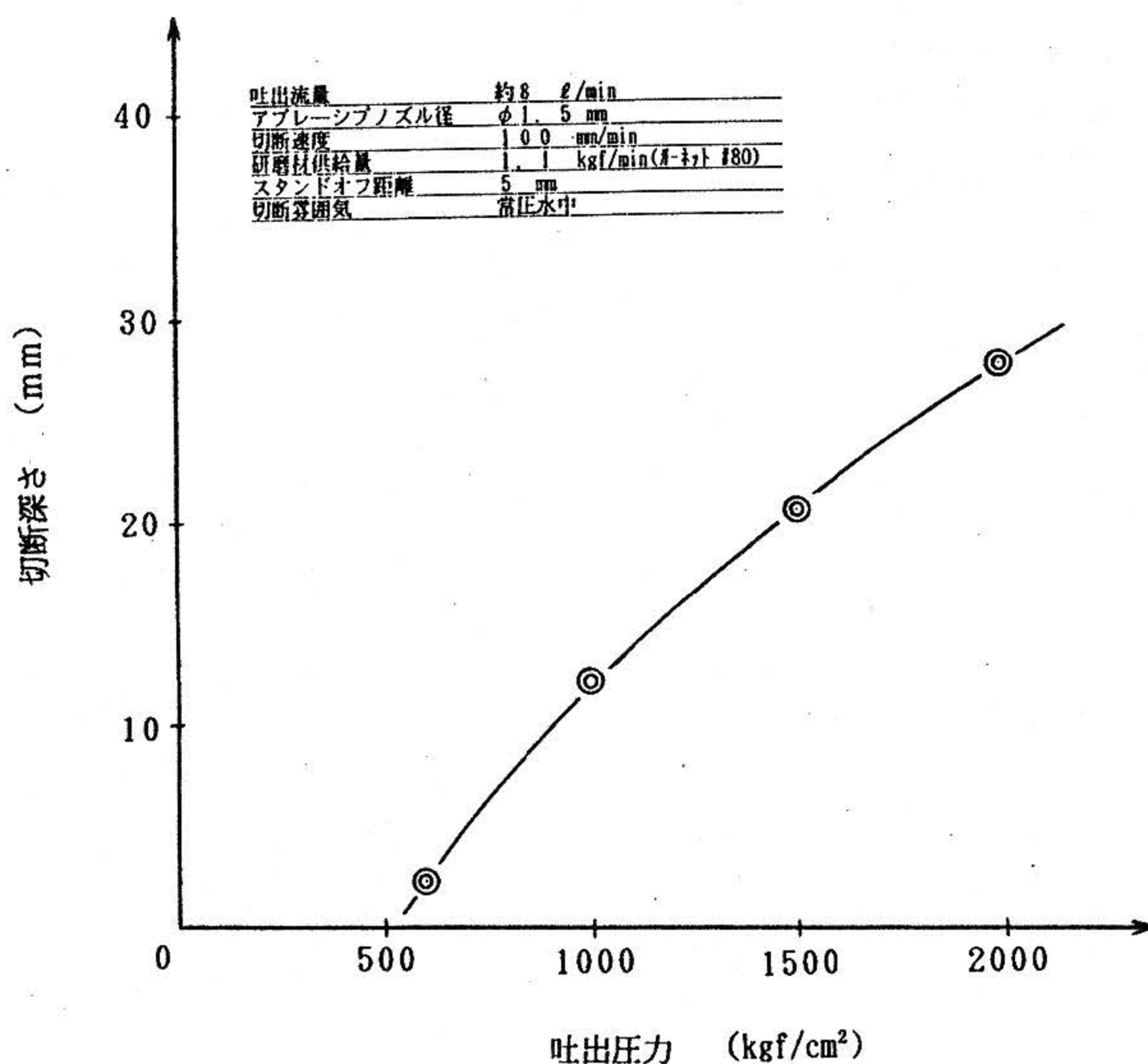


図 4 吐出圧力影響試験結果

Fig. 4 Correlation between water jet pressure and kerfing depth

表4 圧力・流量・ノズル径・反力相関表

Table 4 Correlation between water jet pressure, water nozzle diameter, flow rate and counter force

$$Q = 0.5 \times d_n^2 \times \sqrt{P}$$

$$F = 0.0238 \times Q \times \sqrt{P}$$

P:圧力 (kgf/cm²)
Q:流量 (ℓ/min)
d_n:ノズル径 (mm)
F:反力 (kgf)

P(kgf/cm ²) d _n (mm)		500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000
0.10	Q (ℓ/min)	0.11	0.16	0.19	0.22	0.25	0.27	0.30	0.32
	F (kgf)	0.06	0.12	0.18	0.23	0.30	0.35	0.42	0.48
0.20	Q (ℓ/min)	0.48	0.63	0.77	0.89	1.00	1.10	1.18	1.26
	F (kgf)	0.26	0.47	0.71	0.95	1.19	1.43	1.66	1.90
0.30	Q (ℓ/min)	1.01	1.42	1.74	2.01	2.25	2.46	2.66	2.85
	F (kgf)	0.54	1.07	1.60	2.14	2.68	3.21	3.75	4.30
0.40	Q (ℓ/min)	1.79	2.53	3.10	3.58	4.00	4.38	4.73	5.06
	F (kgf)	0.95	1.90	2.86	3.81	4.76	5.71	6.66	7.62
0.50	Q (ℓ/min)	2.80	3.95	4.84	5.59	6.25	6.85	7.40	7.91
	F (kgf)	1.49	2.97	4.46	5.95	7.44	8.93	10.42	11.91
0.60	Q (ℓ/min)	4.02	5.69	6.97	8.05	9.00	9.86	10.65	11.38
	F (kgf)	2.14	4.28	6.42	8.57	10.71	12.85	15.00	17.13
0.70	Q (ℓ/min)	5.48	7.75	9.49	10.96	12.25	13.42	14.49	15.50
	F (kgf)	2.92	5.83	8.75	11.66	14.58	17.49	20.40	22.73
0.80	Q (ℓ/min)	7.16	10.12	12.39	14.31	16.00	17.53	18.93	20.24
	F (kgf)	3.81	7.62	11.42	15.23	19.04	22.85	26.65	30.47
0.90	Q (ℓ/min)	9.06	12.81	15.69	18.11	20.25	22.18	23.96	25.61
	F (kgf)	4.82	9.64	14.46	19.28	24.10	28.91	33.74	38.55
1.00	Q (ℓ/min)	11.18	15.81	19.36	22.36	25.00	27.39	29.58	31.62
	F (kgf)	5.95	11.90	17.85	23.80	29.75	35.71	41.65	47.60

注) 上表中, F (kgf)は水のみ噴射したときの反力である。

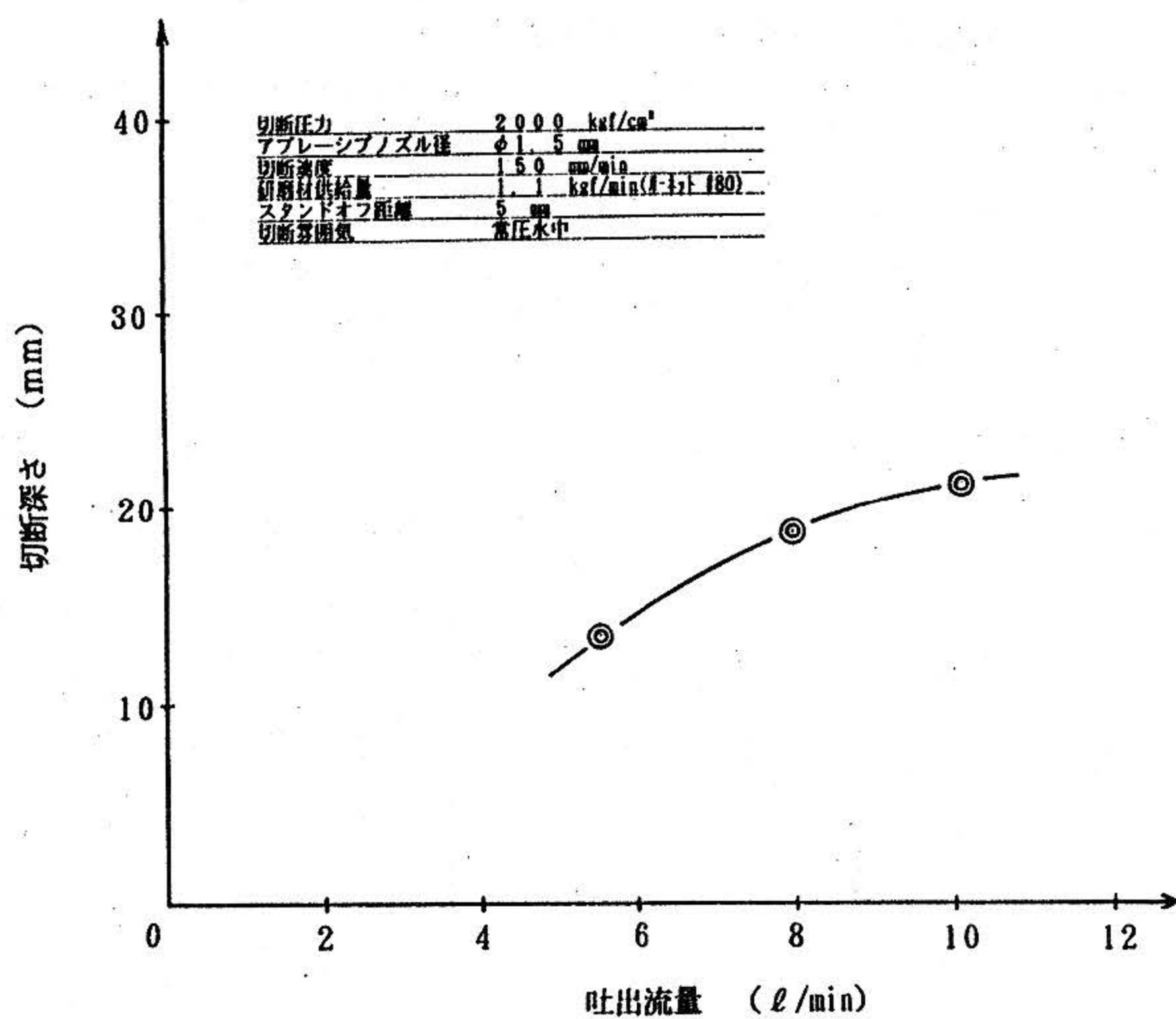


図5 吐出流量影響試験結果

Fig. 5 Correlation between water jet flow rate and kerfing dept

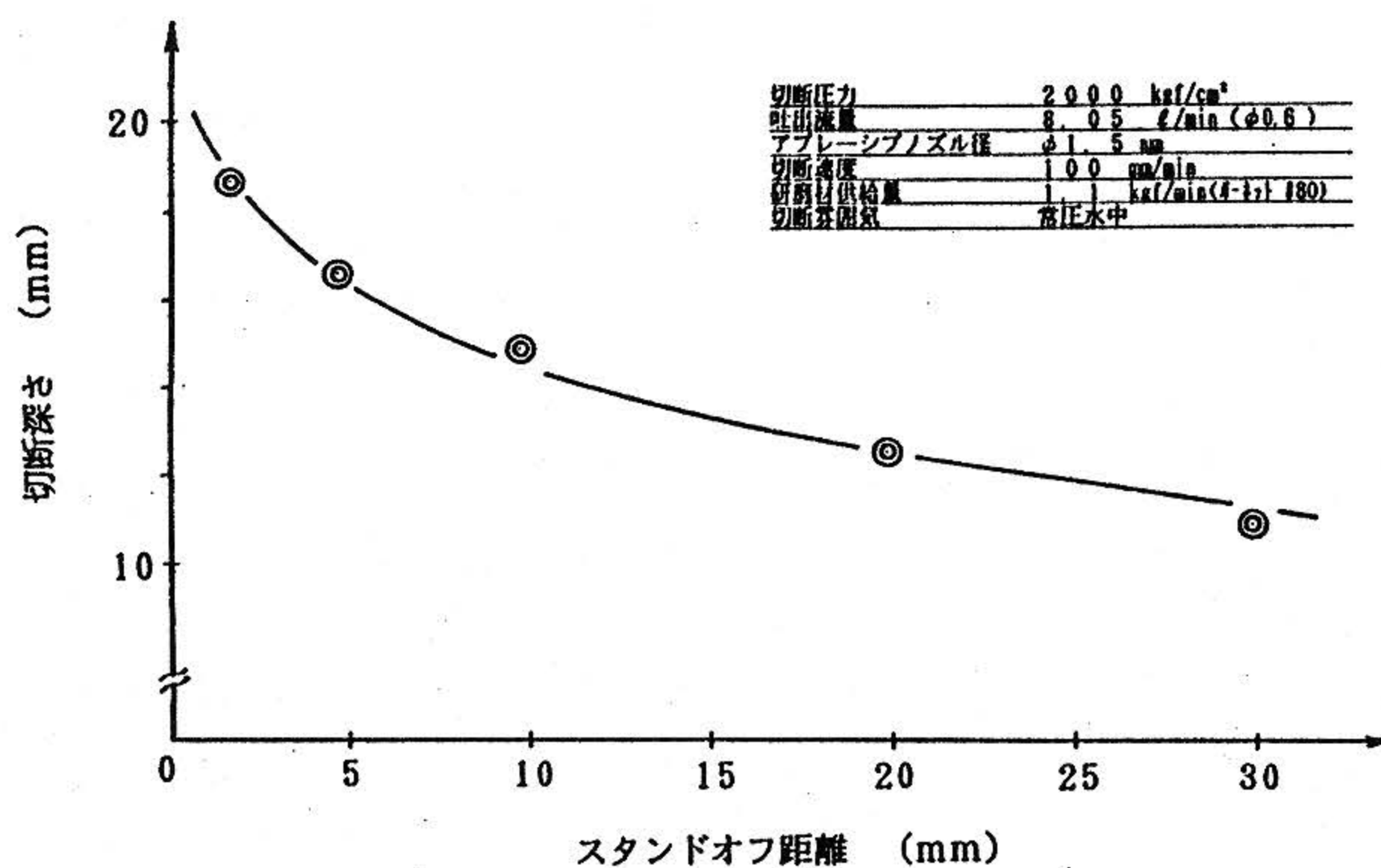


図6 スタンドオフ影響試験結果

Fig. 6 Correlation between stand off distance and kerfing depth

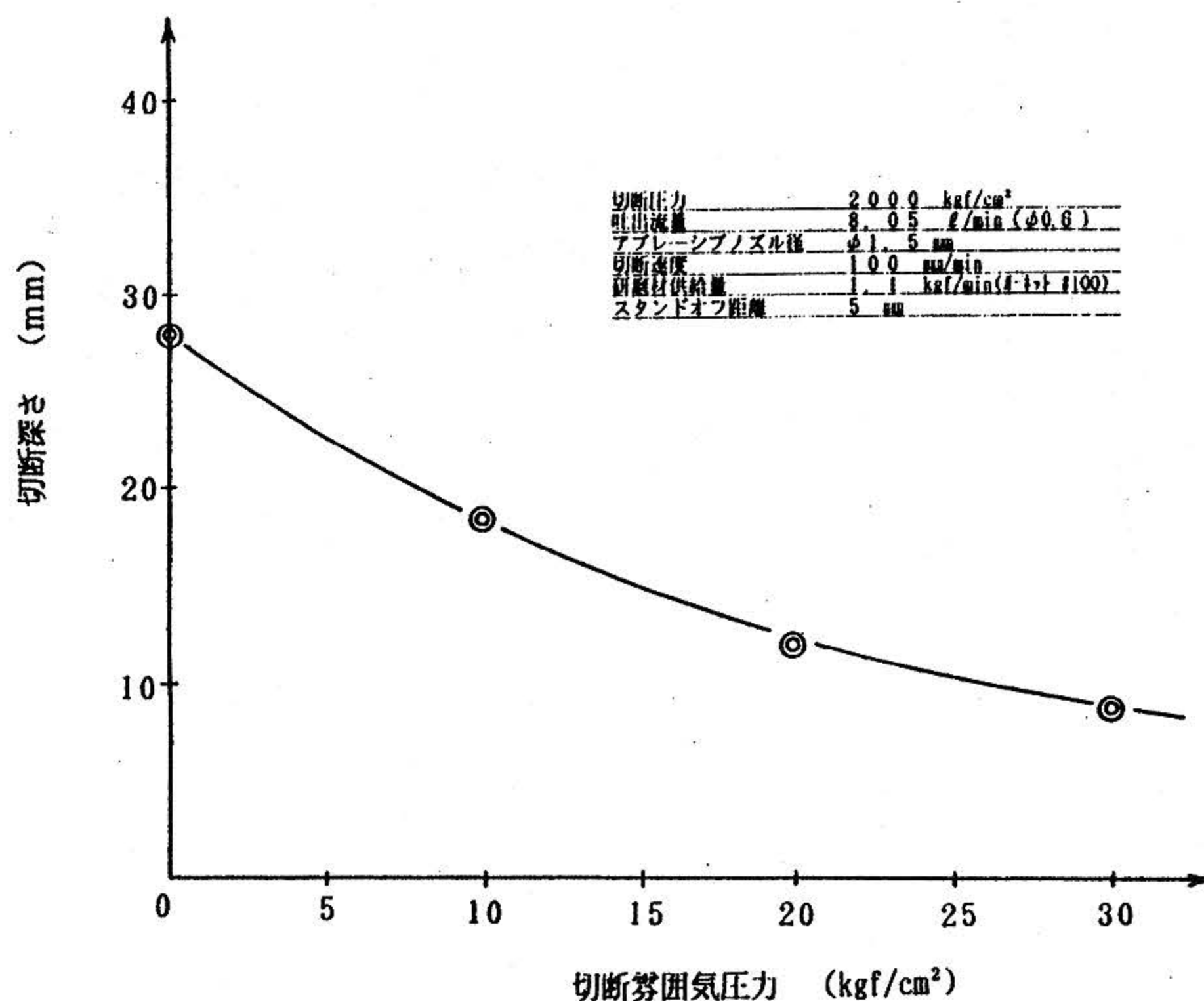


図7 環境圧力影響試験結果
Fig. 7 Correlation between environmental pressure and kerfing depth

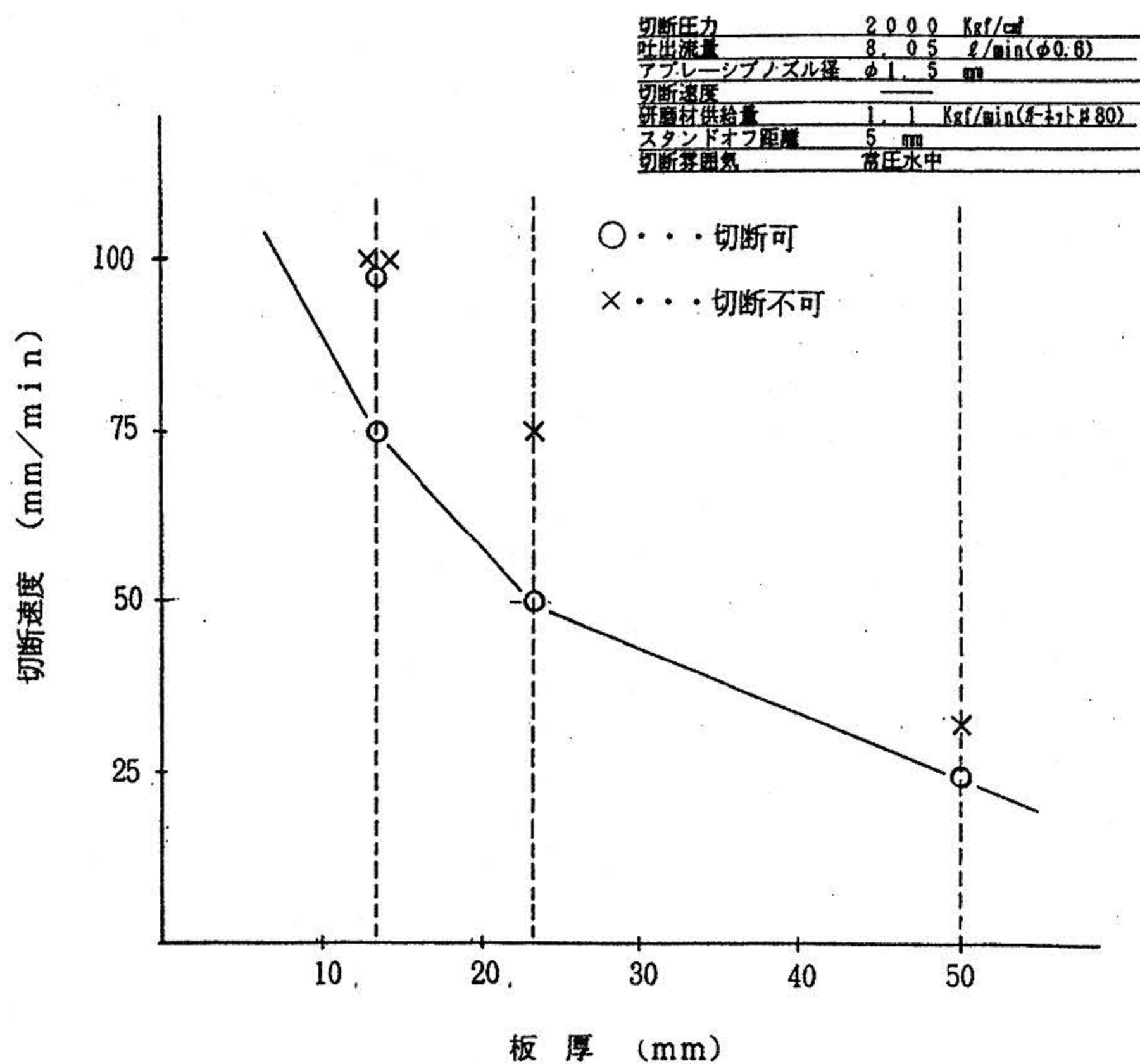


図8 板厚影響試験結果
Fig. 8 Correlation between test plate thickness and kerfing depth

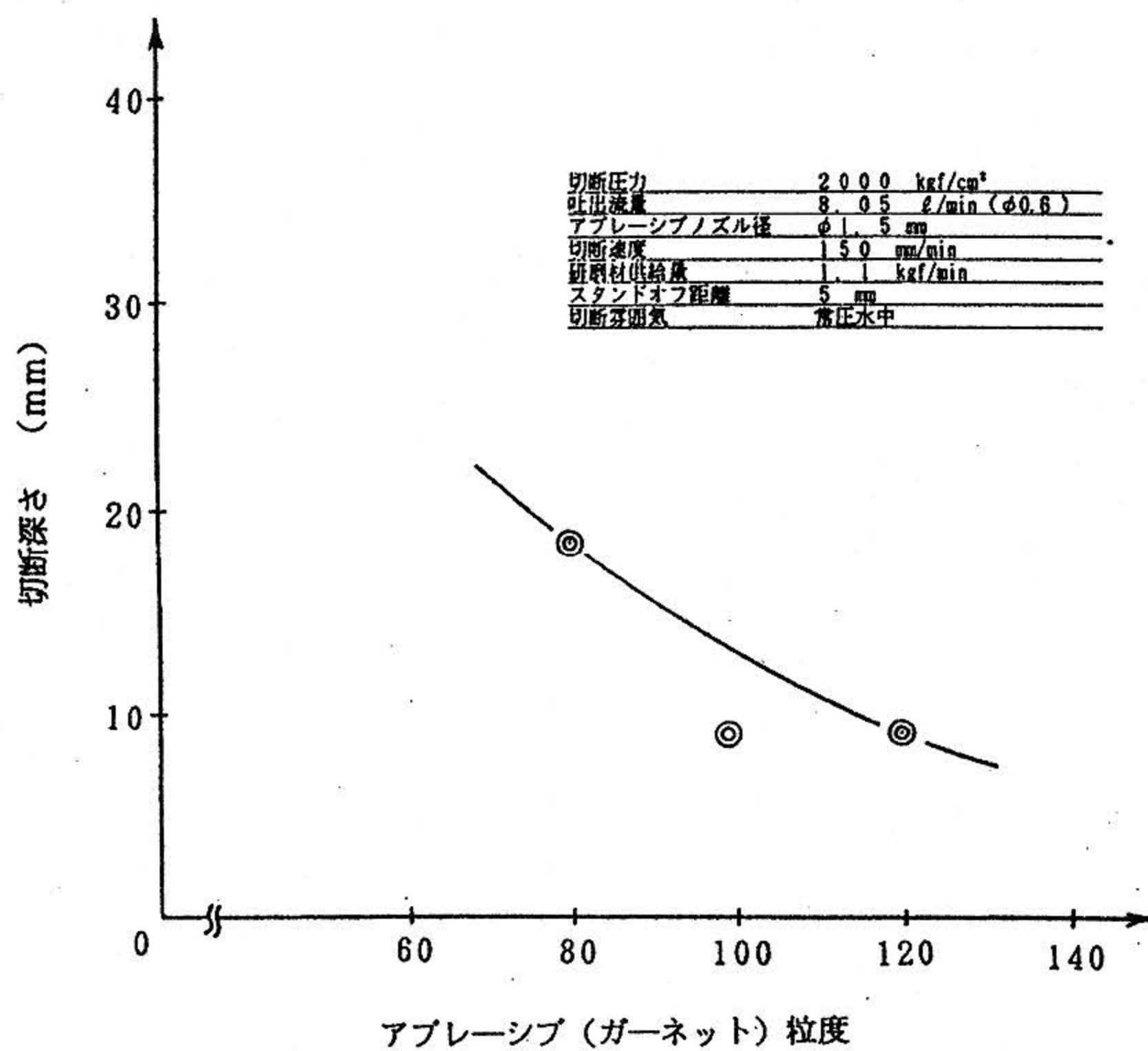


図9 アブレイシブ粒度影響試験結果

Fig. 9 Correlation between the abrasives size and kerfing depth

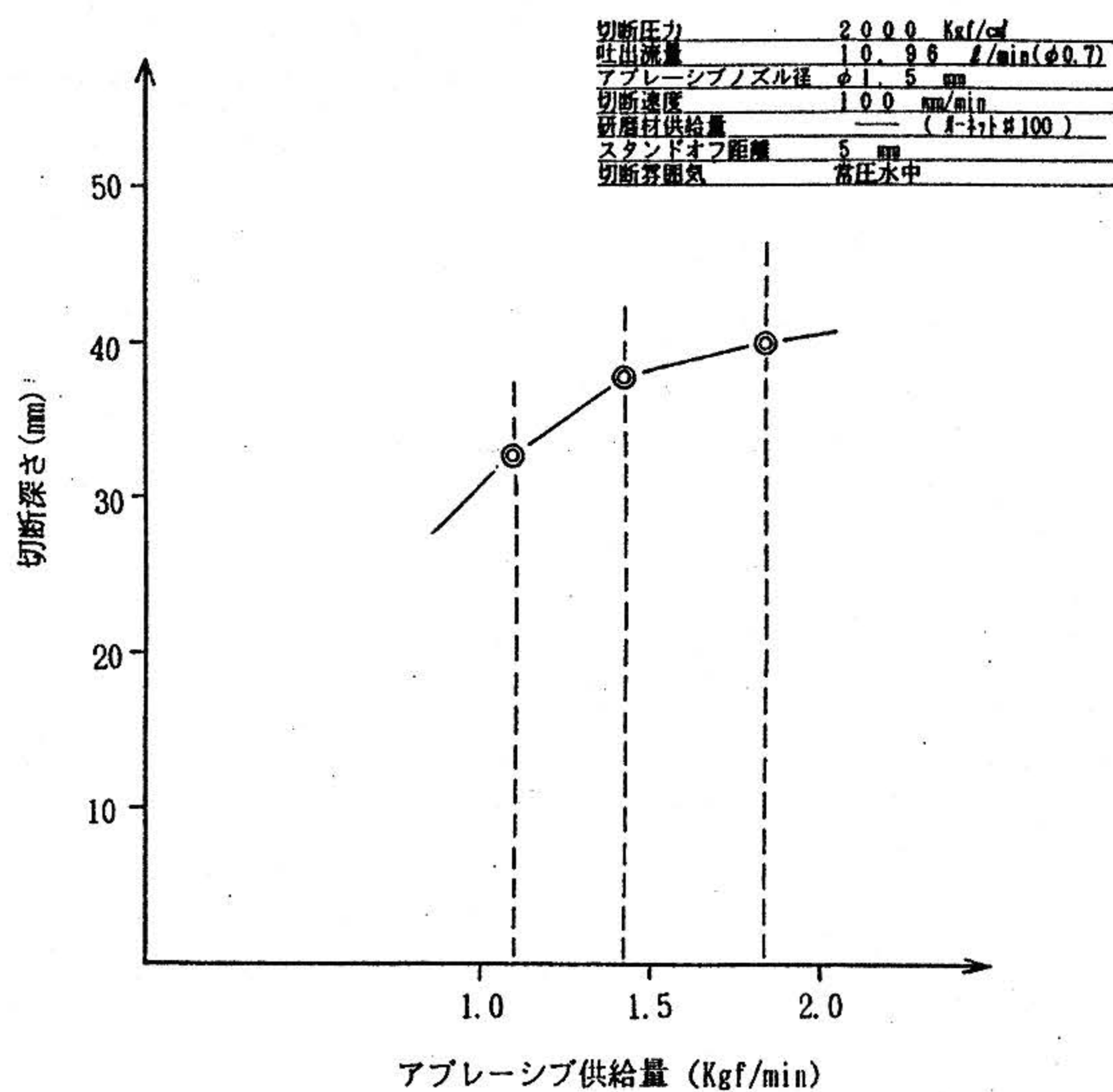


図10 アブレイシブ供給量影響試験結果

Fig.10 Correlation between the abrasive supply rate and kerfing depth

4.6 アブレーション粒度影響試験 (図9)

板厚 30 ミリのテストピース (SS41) をテーパ加工して切断肉厚が連続的に変化する状況を設定し、肉厚の薄いほうから厚いほうへ切断を行い切断可能板厚を「切断深さ」として評価した。

アブレーション粒度の変化に伴いスラリー中のアブレーション沈降速度が変化するが、過度な沈降によるアブレーション供給不良を避けるためスラリー中のポリマー濃度を適宜変化させた。

4.7 アブレーション供給量影響試験 (図10)

板厚 30 ミリのテストピース (SS41) をテーパ加工して切断肉厚が連続的に変化する状況を設定し、肉厚の薄いほうから厚いほうへ切断を行い切断可能板厚を「切断深さ」として評価した。

アブレーションの供給にはチューブポンプを使用し、ポンプの回転数を制御することによりアブレーション供給量 (スラリー供給量) を調整した。

5 考 察

5.1 圧力影響試験

ウォータージェットの吐出圧力を P_j 、切断深さを D とし、単位吐出圧力あたりの切断深さを見ると表5の通りであった。

このことから、ウォータージェットの吐出圧力にはほぼ比例して切断能力が上昇すること、及び $1,000\text{kg/cm}^2$ 未満の圧力では効率がかなり低下することが示唆された。

表5 吐出圧力影響試験結果

Table 5 Result of water jet pressure variation test

P_j (kg/cm ²)	D (mm)	$D/P_j \times 10^3$
600	2.5	4.2
1,000	12.3	12.3
1,500	20.9	13.9
2,000	28.0	14.0

5.2 流量影響試験

ウォータージェットの流量を Q 、切断深さを D とし、単位流量あたりの切断深さを見ると表6の

通りであった。

ウォータージェットの吐出流量の増大に伴い切断深さは増加するが、一次的な比例関係ではなく、吐出圧の増加ほどの効果はないと考えられた。

表6 吐出流量影響試験結果

Table 6 Result water jet flow rate variation test

Q (ℓ/min)	D (mm)	D/Q
5.59	13.5	2.41
8.05	18.5	2.30
10.96	21.0	1.92

5.3 スタンドオフ影響試験

スタンドオフを SOD (Stand off distance)、切断深さを D とすると結果は表7の通りであった。スタンドオフ5ミリでの切断深さを100%とした場合の各スタンドオフにおける%を併記する。

スタンドオフが小さければ切断効率は上昇することが明瞭となった。

実用化に向けてはスタンドオフの制御精度の向上がポイントと考えられ、超高圧ポンプの計画にあたっては、スタンドオフの許容最大値と要求される切断速度を基に他の諸元を決定する手順が有効と考えられる。

表7 スタンドオフ影響試験結果

Table 7 Result of stand off distance variation test

SOD(mm)	D (mm)	D (%)
2	18.7	112
5	16.7	100
10	15.0	90
20	12.5	75
30	11.0	66

5.4 環境圧力影響試験

環境圧力を P_E 、切断深さを D とすると結果は表 8 のとおりであった。

1. 気圧での切断深さを 100% とした場合の各深度における%を併記する。

この結果により、切断環境圧力（深度）の増大により切断効率が低下することが明確となった。

原因としては環境圧力の増大によりキャビテーションが抑制され、水中におけるウォータージェット周囲の空洞化が制限され、ウォータージェットと外周の環境水との剪断力が働くこと、及び外周の環境水をも高速化することによる噴流速度の低下が考えられる。

改善方法としてはガス注入によるウォータージェット周囲の強制空洞化などが考えられるが、今回の実験では装置等の制限により試みることができなかった。

表 8 環境圧力影響試験結果

Table 8 Result of environmental pressure variation test

P_E (kg/cm ² AB)	D (mm)	D (%)
1 (Dry)	28.0	100
1 (Immersion)	28.0	100
2	27.0	96
11	18.3	65
21	12.1	44
31	9.0	32

表 9 板厚影響試験結果

Table 9 Result of test plate thickness variation test

T (mm)	V (mm/min)	$T \times V$ (mm ² /min)
12	100	1200
22	50	1100
50	25	1250

5.5 板厚影響試験

板厚を T 、切断速度を V とすると結果は表 9 のとおりであった。

単位時間あたりの切削面積の代表値として $T \times V$ の値を併記する。

ウォータージェット側の条件が一定であれば、単位時間あたりの切削面積は切断対象の板厚によらずおおむね一定であることが分かる。切断幅を一定とすると単位時間あたりの切削体積がほぼ一定であると言える。

5.6 アブレイシブ粒度影響試験

アブレイシブ粒度を #、切断深さを D とすると結果は表 10 の通りであった。

100#での切断深さを 100% とした場合の各 # における%を併記する。

この結果により、アブレイシブ粒度が大きくなるに従い切断能力が向上することが分かった。

試験片が SS41 であったことから、この結果は硬度の低い材料についての傾向として用いることができると考えられる。

表 10 アブレイシブ粒度影響試験結果

Table 10 Result of the abrasive size variation test

#	D (mm)	D (%)
80	18.5	185
100	10.0	100
120	9.2	92

5.7 アブレイシブ供給量影響試験

アブレイシブ供給量を Q_A 、切断深さを D とすると結果は表 11 のとおりであった。単位供給量あたりの切断深さを併記する。

アブレイシブ供給量の増加に伴い切断能力は向上するが、リニアな効率は得られないことが分かる。ただし、アブレイシブ自体のコストは大きくないため、切断システムの設計にあたっては、アブレイシブの連続大量供給が施工時間を短縮する有力な手段の一つとなる可能性があることが示唆された。

表11 アブレイシブ供給量影響試験結果
Table 11 Result of the abrasive supply rate variation test

Q_A (kg/min)	D (mm)	D/Q_A
0.7	14.3	20.4
1.0	18.5	18.5
1.3	20.5	15.8

6 まとめ

アブレイシブウォータージェットによる水中切断特性に関し、切断能力に係わる諸元を変化させて水中における実験を行い次の知見を得た。

- ① 切断能力はウォータージェットの吐出圧力や流量などのポンプの力量にほぼ比例して向上する。
- ② 切断効率を向上させるにはスタンドオフの制御精度の向上が効果的である他、アブレイシブの連続大量供給も有力と考えられる。

- ③ 切断能力は深度の影響を大きく受ける。100 m では大気圧状態の約3分の2に減少し、300 m では約3分の1となる。深度の増大による切断効率の低下を抑制するにはウォータージェット周囲の空洞化等が考えられる。
- ④ 同様なポンプ力量では単位時間あたりの切削面積（体積）はほぼ一定と考えて良い。
- ⑤ 硬度の低い材料ではアブレイシブの粒度を大きくすることで切断時間を短縮する事ができる。

参考文献

- 1) 小川洋司・住友 敬：水中切断技術の研究開発（その3）. ウォータージェット, 7(3), 12-19. (1990)
- 2) 柳内拙郎：高圧水での硬質材の切断が可能なウォータージェット. 省力と自動化, 8, 46-47. (1985)

(原稿受理：1992年11月13日)