

FRP船廢船解体技術に関する研究

林 慎也*・永松 徳二*

Study on Breaking Technique of Waste FRP Boats

By

Shinya HAYASHI and Tokuji NAGAMATSU

Abstract

Old boats made of FRP (glass fiber reinforced plastics) that were constructed in the early days of the FRP-application and completed their expected life span of more than 20 years, have begun to be retired from service. However, the breaking system of the waste FRP boats has not been established yet, because of the difficulties in breaking them of large scale and made by hard-processible material.

The main purpose of this study is to know the possibilities of applying conventional techniques to the cutting method of FRP boats from the view-points of efficiency, economical merits, safety and influence on environment. In the study, both oxygen cutting and explosive cutting methods were investigated as techniques for breaking up FRP boats.

The oxygen cutting which included gas cutting, powder cutting and oxygen lancing were examined. The results showed oxygen lancing with water spraying was the best way which had sufficient ability to cut FRP with less influence on environment.

The explosive cutting method was found to have good ability to cut FRP, but it caused a very big explosive noise in the air. The explosive cutting under water decreased noise, but it yielded explosive vibration, which was necessary to be decreased in practical application.

目次

	頁		頁
1. まえがき	12	2.3. パウダー切断実験	20
2. 酸素切断による解体方法の研究	14	2.3.1 実験方法	20
2.1. 熱伝導実験	14	2.3.2 実験結果及び考察	20
2.1.1 実験方法	14	(1) 切断性能	20
2.1.2 実験結果及び考察	15	(2) 問題点	20
2.2. ガス切断実験	16	2.4. 酸素ランス切断	21
2.2.1 実験方法	16	2.4.1 実験方法	21
2.2.2 実験結果及び考察	17	2.4.2 実験結果及び考察	21
(1) 切断性能	17	(1) 切断性能	21
(2) 問題点	19	(2) 問題点	22
		2.5. まとめ	22
		3. 爆破切断による解体の研究	22
		3.1. 空中爆破実験	22
		3.1.1 実験方法	22
		3.1.2 実験結果及び考察	25

* 材料加工部

原稿受付：昭和62年10月29日

- (1) 各葉種の切断能力 25
- (2) 板厚と葉量の関係 26
- (3) 爆破振動 27
- (4) 爆破騒音 29
- (5) 重ね切断 30
- 3.2. 水中爆破切断 30
 - 3.2.1 実験方法 30
 - 3.2.2 実験結果及び考察 30
 - (1) 水柱 30
 - (2) 水中爆破騒音 32
 - (3) 水中爆破振動 32
 - (4) 問題点 33
- 3.3. まとめ 33
- 4. あとがき 34
- 5. 参考文献 34
- 6. 付録 34
 - 6.1. 船用FRP単板 34
 - 6.2. 熱切断 35
 - 6.3. 爆破切断 35

1. ま え が き

繊維強化プラスチックFRP材はその耐食性、難吸水性、防虫性、水密性、成型性、修理が容易、軽量、等優れた特性を持っているため、昭和30年代後半から小型船舶・舟艇の構造材料として一般化した。さらに、船大工の老齢化と後継者の養成難、木材資源の枯渇といった条件が積み重なり、昭和40年代中頃から急速に船舶用材としての使用が拡がり、小型船の建造材料の王座を占めるに至っている。

FRPの需要動向¹⁾をFig. 1に示す。図から明らかなように、近年、漁業・造船業の不振から需要比率は減少してはいるが、なお、年間約25万トンのFRP総供給量のうちおよそ14%にあたる約4万トンが船用に使われ、Fig. 2²⁾に示すように現在年間約4万隻のFRP船が建造されている。使用建造材料により比較すると、レジャー用ボートは殆ど総てFRP製であり、漁船の場合には、50%以上がFRP材により建造されている³⁾(Fig. 3)。

当初、FRPの寿命は20年ぐらいと予測されていたが、FRP船は修理が比較的容易なことやFRPの材質の経年変化が少ないことから、当初の予測よりも使用寿命が長くなってはいるが、内装に経費のかかっているレジャーボートや修理より新造したほうが経済的にも有利な小さいボートが徐々にではあるが廃船化

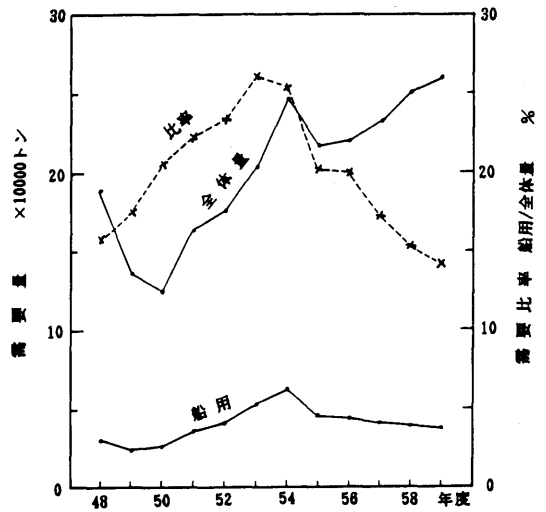


Fig.1 FRPの需要状況

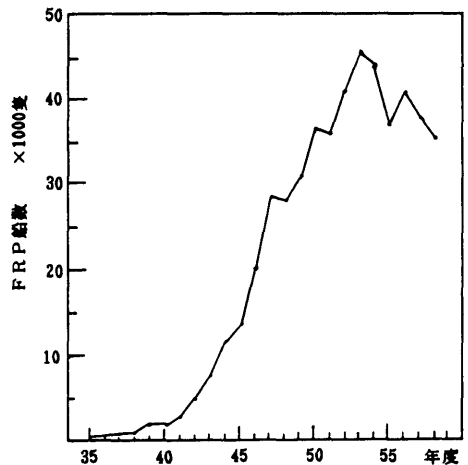


Fig.2 FRP船建造状況

されているのが現状である。しかし、FRP材が実用化されて既に20年以上経過したことであり、その耐用年数からもここ数年の間にFRP船の廃船が大量に出てくることは十分予想される。FRPには不燃性のガラス繊維が層状に入っており、その分難が困難であることや、FRP船廃船を既存の処理ルート（埋め立て、焼却、再利用）に乗せるためには運搬及び処理可能な大きさに前処理しなければならない等、通常のプラスチック以上に処理が困難であり、その上再利用

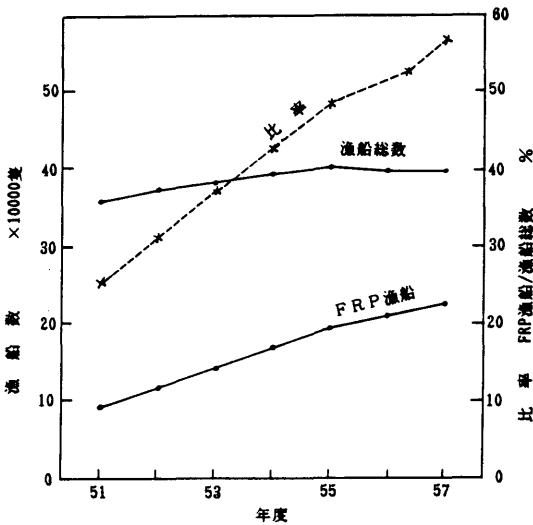


Fig.3 FRP漁船建造状況

・有効利用の目途も立っていない。従って、廃船が大量に発生した場合には、海岸や河川敷きに大量に放置され社会問題になるのは必至と思われる。

FRP船廃船処理に関するフローをFig.4に示す。収集、輸送問題を除くと大きく分けて船体の解体と解体後のFRP廃材の処理とに分けられる。解体処理方法に関しては、昭和57年に全国漁業協同組合連合会が実施したFRP漁船の廃棄処理の経験に関するアンケート調査⁴⁾(Table 1)がある。これによるとFRP廃船・廃材の処理は、カッター、グラインダー、サンダー、丸のこ等機械的切断、および油圧プレス、ブルドーザー、バックホー、回転式剪断等による破碎により小さくしたのち、焼却あるいは埋め立てにより行われたことが判る。しかし、各解体技術は、その特徴をTable 2に示すように、FRP解体に関して、切断能力、安全性、作業・安全性、経済性の各点を総て満足していないのが現状である。

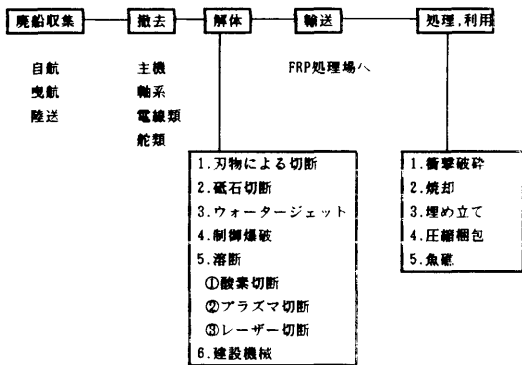


Fig.4 FRP船廃船処理システムフロー

Table 1 FRP廃棄物処理方法

方 法		(件数)		
		焼却	埋め立て	計
切 断	カッター	6	10	16
	グラインダー	2	3	5
	サンダー	2	8	10
	丸のこ	1	2	3
	その他	1	6	7
小計		12	29	41
破 碎	油圧プレス	1	2	3
	ブルドーザー	0	1	1
	回転式せん断	1	2	3
バックホー		1	1	2
小計		3	6	9

Table 2 各種解体技術の特徴

	長 所	短 所
機械的切断	作業性良	厚物は無理、経費大、粉じん・騒音発生
ウォータージェット	切断能力良	経費大、作業性悪、騒音発生
酸素切断	経済的、作業性良	切断能力劣る 黒煙・臭気発生、発火
制御爆破	切断能力優秀、作業性良	大爆音発生、火薬取締法による制約あり
建設機械	作業性良	処理速度遅、粉じん・騒音発生

また、FRP 廃船・廃材の有効利用・再利用方法が確立しているならば、廃船に価値が出ることであり、廃船の処分もスムーズに行われる。しかし、ここ数十年、熱分解による油・ガスの回収、あるいは各種成型品による再利用等種々の有効利用の試みがなされて来たけれども、経済的、技術的に成功した例は未だない。従って、現状ではFRP 船を廃船化する場合には、市町村あるいは専門処理業者の焼却場、埋め立て地で有償で処分せざるを得ない。

廃棄物処理に関する法律としては「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」(昭和45年法律第137号)がある。これによると、漁船等の業務用FRP 船は産業廃棄物扱いとなり事業者は自ら処理しなければならない。一方、個人用レジャーボート等の非業務用FRP 船は一般廃棄物として市町村は生活環境の保全上支障が生じないうちに収集・運搬・処分しなければならないと規定されている。しかしながら、自動車・オートバイ・ピアノ等は適正処理困難物として一般廃棄物として受け付けない都市もあり、また、法的には所有者が解体等の協力をしない場合には市町村は処理しなくても良いとされている。現在、FRP 船の廃棄処分を行わないとしている都市は無いが、将来FRP 船の廃棄が多くなった場合の扱いについては不明である。いづれにしても、最終処理を行うためには廃船の解体技術、及び処理技術を確立する必要がある。

そこで、FRP 船廃船処理システムを早急に確立するため、その第1ステップとして、環境庁の公害防止等試験研究費によりFRP 廃船の解体技術に関する研究を63年度までの4年計画で60年度から開始した。この研究で取り上げた解体技術は酸素切断法(熱切断法の1種、熱切断の分類 Fig.5⁵⁾)及び爆破切断法である。

解体技術としては Table 2 に示す様に種々の既存技術が考えられ、各々長所・短所を有しているが、上記二技術はその欠点を改良する余地があり、改良出来た場合、解体能力、作業性、安全性、経済性並びに環境破壊の観点から、解体技術として最も適していると考えられる。

Table 2 から明らかなように、酸素切断法は作業性・経済性には優れているが肝心の切断能力に劣り、更に火を使用するため黒煙と悪臭を発生するとの問題点を有している。本研究では酸素切断法の切断能力を向上させ、鋼板切断並の切断速度300~400mm/minを得ること、並びに黒煙・悪臭(特に黒煙)の抑制方法に

(370)

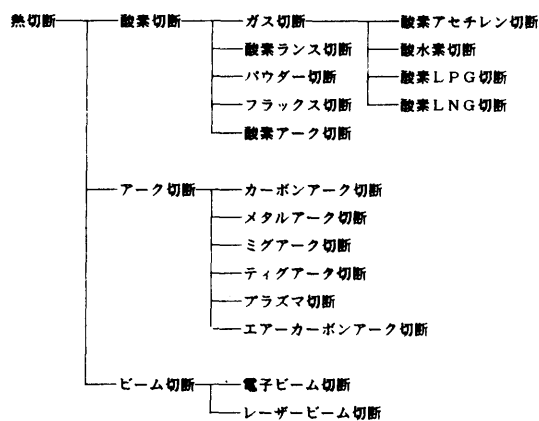


Fig.5 熱切断

ついて検討し、FRP 船解体技術としての可能性について調査した。

一方爆破切断法は切断能力は十分ではあり経済性の点でも優れていると考えられるが、爆破音は著しく、民家に近い所では爆破実施の許可が下りないという障害がある。本研究では、爆薬のFRP 材切断能力を調べるとともに、爆破切断時に生じる騒音・振動等公害問題を検討し、安全性・取り扱い性の見地をも加えて、爆破切断法がFRP 廃船の解体に適しているか否かを調査した。

尚、熱切断と爆破切断の概説を付録に示した。

2. 酸素切断による解体方法の研究

2.1. 熱伝導実験

2.1.1. 実験方法

本研究に使用したFRPは船用として一般に使用されているものと同種のもので、ガラス繊維としてチョップドストランドマットMとロービングクロスRを交互に積層し(MR構成)、熱硬化性樹脂である不飽和ポリエステル樹脂により固めたものである。チョップドストランドマットとロービングクロスを Photo 1 に、また積層状況を Fig.6 に示す。板厚は基本的には約10mmで、その構成は(M+R)×5+Mである。供試材は積層した後、何等板厚方向の加工を施してないため同一チャージでも板厚が一定でなく1mm程度の差が有る。従って、切断箇所の厚さ測定を行い、各実験毎に示してある。また、各種実験では10mmのものと比較検討のため約5mm, 20mm, 30mmのものも使用した。これらの構成は各々(M+R)×2+M, (M+R)×10

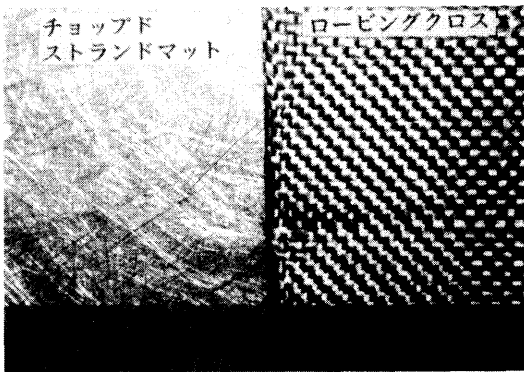


Photo.1 ガラス繊維

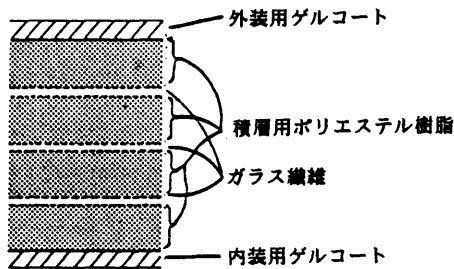


Fig.6 船用FRP材の構成

+M, (M+R) ×15+Mとなっている。使用したガラス繊維の重量はMが600g/m², Rが810g/m²で、ガラス含有率は重量比約40%である。

FRP材を酸素切断法により切断するにはFRP材の切断箇所を温度を上昇させて、樹脂を熱焼させる必要がある。そこで、酸素切断実験を開始する前に、表面を加熱した場合の板厚方向の熱伝導を調べた。

FRPの熱伝導率を昭和電工製断熱性試験装置により求めた。計測に用いたFRP材は厚19mm×縦250mm×横250mmであった。熱伝導率の測定は分解ガス等の発生を防ぐため150℃までの温度で行った。次に、FRP単板の熱伝導状況を調べた。この場合には、ヒーターを約300℃に加熱した後、板厚19mmのFRP単板を載せFRP材の温度の経時変化を測定した。温度は赤外線放射温度計（日本電子製サーモグラフ）および熱電対を用いて計測した。熱伝導状況を調べた後、ヒーター温度を550℃まで上昇させFRP材の変化を調べた。

2.1.2 実験結果及び考察

熱伝導率計測結果を Fig. 7 に示す。同図に示す鉄に

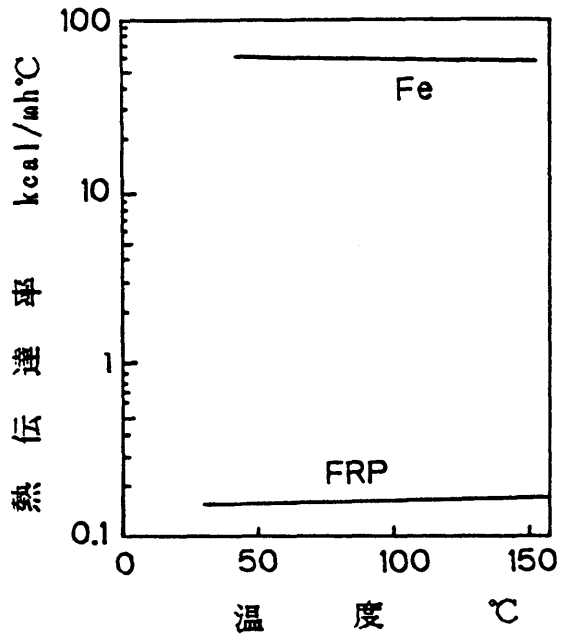


Fig.7 FRP材の熱伝導率

については公表データ⁶⁾より引用した。同図から明らかかなようにFRP材の熱伝導率は約0.16kcal/mh°Cと鉄の約40kcal/mh°Cに比べて2ケタも低くなっており、熱伝導が非常に悪いことが分かる。これは樹脂自体もかなり熱伝導が悪い上に、積層されているガラス繊維の断熱作用が大きく影響しているためと考えられる。熱伝導状況の測定結果を Fig. 8 に示す。同図内で“熱源からの距離1.5mm”は一層目のチョップドストランドマットと二層目のロービングクロスの中の位置での計測結果である。“熱源からの距離19mm”はヒーターとは反対側の表面上を意味している。この図から明らかかなように温度は加熱したヒーターに載せた直後からゆっくりと上昇する。実験開始後1分後には1.5mmの位置と19mmの位置とでは約100℃の温度差が出来る。それ以後その差を保ちながらFRP全体の温度は非常に緩やかに上昇する。鉄の場合には、熱伝導が極めて良く短時間で均一温度になることは周知の事実である。しかし、FRP材の場合には5分程度の加熱ではヒーター側と反対側では依然100℃の差を保っており板厚方向への熱伝導が悪いことが分かる。加熱側から1.5mmの位置ではヒーターから極めて近い距離にも拘わらず、一枚のガラス繊維のために加熱温度が300℃の場合に

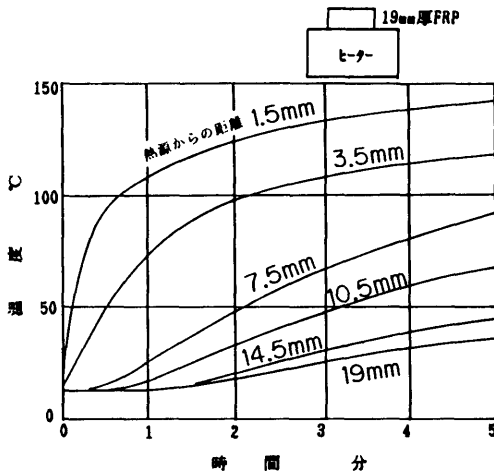


Fig.8 FRP材の温度伝達状況

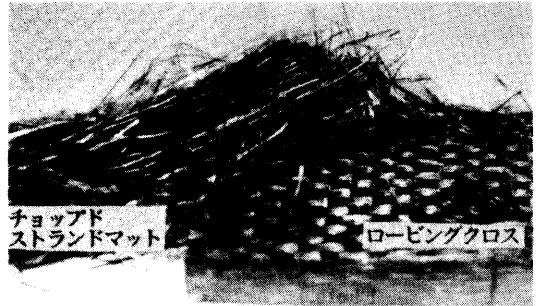


Photo.2 加熱されたFRP材

Table 3 排ガス成分分析結果

測定項目	400℃		600℃		800℃		1000℃		分 析 方 法	
	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2	No.1	No.2		
窒素酸化物(ppm)	3以下	4	6	5	5	9	12	14	JIS K 0104	
硫黄酸化物(ppm)	8	4	9	8	8	7	18	12	JIS K 0103	
塩化水素(ppm)	21	12	10	12	9	10	9	8	JIS K 0107	
ガ ス 成 分	二酸化炭素(%)	0.0	0.0	6.7	0.1	0.3	7.4	4.0	6.5	JIS Z 2301
	酸 素(%)	18.8	18.9	8.7	18.8	18.6	5.5	13.9	8.6	JIS Z 2301
	一酸化炭素(%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	JIS Z 2301
分 窒 素(%)	81.2	81.1	84.6	81.1	81.1	87.1	82.1	84.9	計算による	
煤 塵量(g/m ³ N)	—	—	—	—	9.3	3.5	—	—	JIS Z 8808	

*各温度No.1,NO.2の2回実施

も5分程度の加熱では150℃程度にしか上昇しない。

FRP材は300℃程度に加熱されるとわずかに煙が立ち始める。更に加熱していくと積層作業(ハンドレイアップ作業)をしやすいように混入しているスチレンの臭い(無害)が強烈になり、450~500℃では猛烈な黒煙が発生する。しかし550℃程度までの温度で発火することはない。ヒーター温度500℃で20分間加熱したFRP材をPhoto.2に示すがヒーター側第1層目のチョップドストランドマットと第2層目のロービングクロスは炭化しているが、第3層目以降には色彩的变化は見られなかった。また、第2層めまでの樹脂は焼けて無くなっており、第1層めのチョップドストランドマットはFRP材から完全に分離していた。

FRP材を加熱すると各種分解ガスが発生する。FRP燃焼によるガス類の発生についての調査を電気炉を利用して実施した。その結果をTable 3に示すが、各種

ガスの発生量は少なく、環境破壊に関しては問題はない。従って、酸素切断法によりFRP材を切断した場合、燃焼により発生したガスに関しては、環境破壊的な観点からは問題は無いと考えられる。

2.2 ガス切断実験

2.2.1 実験方法

本実験では予熱ガスとしてLPガス、アセチレンガス、及び水素ガスの三種類のガスを使ってFRP解体技術としての適性を比較・検討した。アセチレンは、ガス切断法開発当初より用いられ、数十年に亘る開発により鋼材に関しては極めて優秀な切断性能を得るに至ったが、現在では価格上あるいは供給の安定性の上でLPガスが主流の座をとって代わった。水素ガスは火炎が無色に近いため中性炎の調整が難しい等の理由から殆ど使用されていない。

切断実験は鋼材に使用されている従来型の火口を使

Table 4 酸素切断実験結果

切断 板厚	切断 可否	予熱 ガス	火口 種類	予熱ガス流量 l/h		切断酸素		切断速度・火口高さ		鉄粉		備考	
				ガス	酸素	圧力 kg/cm^2	流量 l/h	mm/min	mm	メッシュ	供給速度		酸素圧
9mm	×	LPガス	小池106#3	360	1370	1.5	2700	40	10				
9mm	○	LPガス	小池106#3	310	1180	1.5	2700	70	20			予熱火口1本付加	
9mm	○	LPガス	小池106#3	310	1180	1.5	2700	150	25			予熱火口2本付加	
19mm	○	LPガス	小池106#3	310	1180	1.5	2700	70	25			予熱火口2本付加	
9mm	×	LPガス	田中3155B	750	3000	5.0	7500	100	8				
9mm	○	LPガス	田中3155B	750	3000	5.0	10400	100	8				
9mm	×	LPガス	田中3155B	750	3000	5.0	10400	120	8				
9mm	○	アセチレン	田中KTNo2	—	—	5.0	—	80	8				
9mm	○	アセチレン	田中KTNo2	—	—	7.0	—	100	8				
9mm	×	アセチレン	田中KTNo2	—	—	7.0	—	120	8				
9mm	○	水素ガス	田中3010X	2500	1000	3.5	6800	100	8				
9mm	×	水素ガス	田中3010X	2500	1000	3.5	6800	120	8				
9mm	○	LPガス	田中3051#2	260	940	3.5	4200	200	10	100	200g/min	0.35kg/cm ²	パウダー切断

って実施した。切断条件のうち酸素流量、予熱ガス流量、及び火口高さを種々変化させ切断可能速度を求めた。切断は大気中で実施したが、黒煙発生防止対策のための一方法として水中でも実施した。切断条件はTable 4の実験結果総括表に示してあるが、切断火口の種類、予熱ガス流量並びに切断酸素圧・流量を種々変化させた。

実験に使用したFRP単板の板厚は、9mmと19mmである。

2.2.2 実験結果及び考察

(1) 切断性能

まず、予熱ガスとして最も一般的なLPガスを用いて実験を行った。火口としては鋼材の切断に一般的に使用されている小池酸素106#3（JIS 3型切断火口、予熱ガスLPガス）切断火口を用いてFRP単板の切断を実施した。しかし9mm厚FRPを40mm/minの切断速度（火口高さ10mm）で切断分離することが出来なかった。そこで、熱量を増す目的で先行予熱火口（3φ特殊ミキシング火口、予熱ガス流易1000 l/h 、予熱酸素流量3800 l/h ）を切断線前方35mmの位置に20°傾けて付加し40mm/minの速度（火口高さ20mm）で9mm厚FRP切断を試み成功した。更に、同じ条件で速度を上げて切断した結果70mm/minの速度まで切断可能であった。次に、Photo. 3に示すように同じ先行予熱火口をもう1本追加して総熱量を増して切断（火口高さ25mm）した結果150mm/minの速度まで9mm厚が切断出来ることが判明した。また、19mm厚の最大切断速度は、同様に先行予熱火口2本を付加した場合の70mm/minであった。

一連のFRP材切断実験の結果以下に述べる現象が明らかになった。

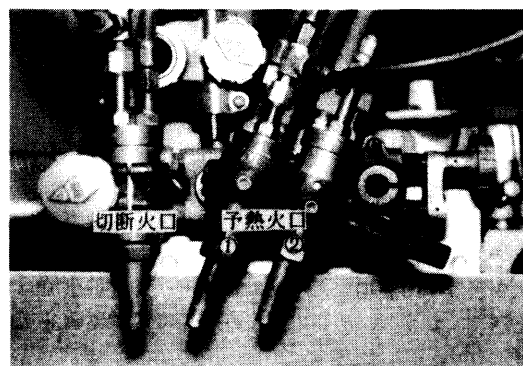


Photo.3 火口取り付け状況

- ①火炎が当たってから数秒後に表層部樹脂を焼却すると同時に炎がFRP表面に広がる。炎がひろがるとともに、刺激性のガス、臭気及び黒煙が発生する。ガラス繊維（軟化点840℃）は炭化するのみで、1.2項に述べたと同じようにガラス繊維の下側の樹脂は燃焼しない。
- ②ガラス繊維は簡単には熔融しないので、ガスの圧力により吹き飛ばす必要がある。吹き飛ばすのに時間を要するので火口位置と最も掘れている位置とは一致しない。
- ③積層しているガラス繊維のうち繊維を積み重ねただけのチョップドストランドマットは比較的容易に吹き飛ばされるが、織っているロービングクロスは困難で

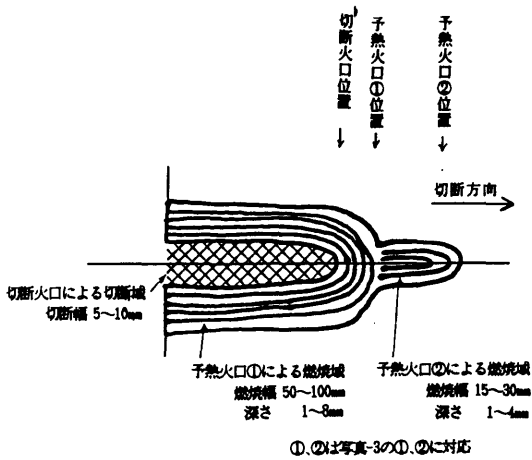


Fig.9 ガス切断時のFRP燃焼状況

ある。

④ガラス繊維を一層づつ吹き飛ばしていくため、平面方向への熱の広がり大きく切断面にはスリパチ状の傾斜がつき、切断幅も大きくなる。切断中の燃焼状況のスケッチをFig.9に示す。

⑤火口直下が分離されないため火炎の戻りがあり、火口が加熱され高温化する。

以上のようにFRP材を分離切断するにはガラス繊維を吹き飛ばす必要があることが判明した。そこで、吹き飛ばす力を増すため切断酸素の圧力・酸素流量を上げた。しかし、酸素の温度が低いと酸素量を増す

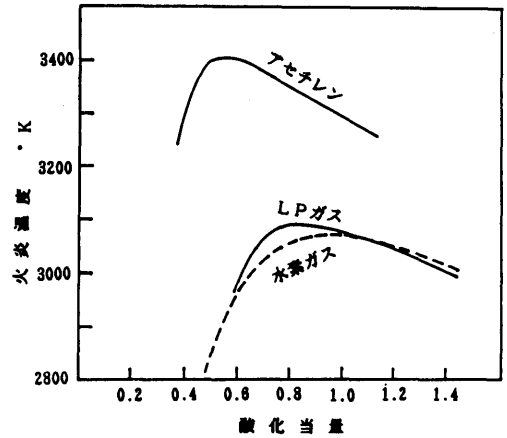


Fig.10 断熱火炎温度

(*酸化当量:電子一層を
取るに必要な物質の量)

と予熱温度が下がる。それを防止するため予熱ガス流量も増やした。LPガス用火口として田中製作所3155BカーテンダイバーNo.2を用い切断酸素流量を5800ℓ/hまで上げ9mm厚FRPを切断した結果、切断火口1本での切断可能速度は80mm/minまで上昇した。更に、切断酸素流量を10400ℓ/hにしたところ最大切断速度は100mm/minとなった。一方、火口の高さについては種々変えて実験したが切断能力には大きな影響は見られ無かった。

次に、予熱ガスの種類による切断性能の差を調べるためLPガス以外にアセチレン、水素ガスの2種類の

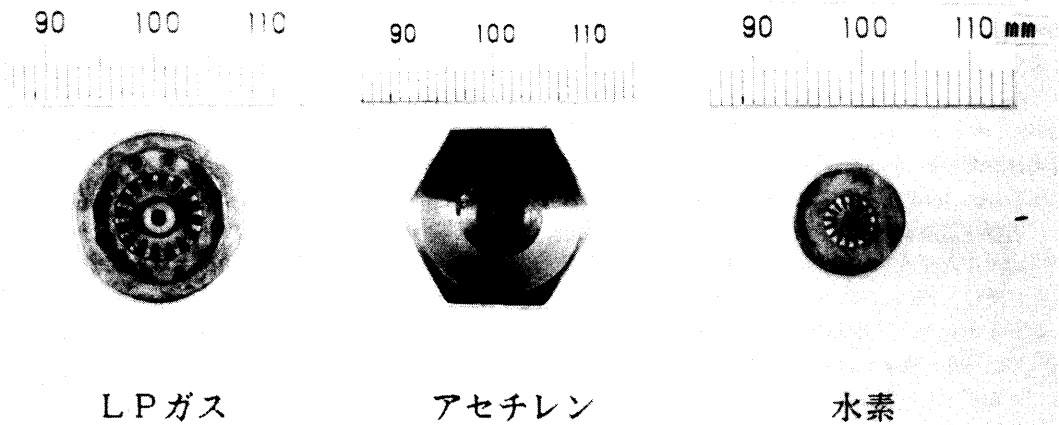


Photo.4 使用火口形状

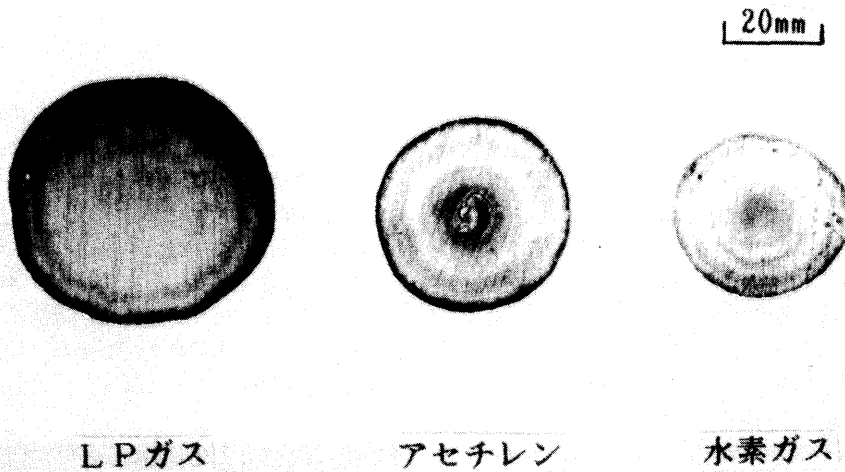


Photo.5 火炎の大きさ (火口高さ8mm)

予熱ガスについても検討した。LPガスを含めた各予熱ガスの断熱火炎温度⁸⁾をFig.10に、用いた火口形状をPhoto.4に、また15秒間予熱(火口高さ8mm)を行った時の火炎の広がり形状をPhoto.5に示す。火炎の温度はアセチレンに比べてLPガス、水素ガスとも約300℃低い。火口はガスの種類に合わせて切断に十分な熱量を与えるように設計されているため、各ガスの特性により孔径等形状が異なっている。LPガスは火炎温度が低い分だけ広がって広い範囲に熱を加えることにより一定の熱量を確保している。しかし、水素ガスは火炎温度が低いにもかかわらず火炎の広がりには3種類のガスの中では一番小さい。これは、水素ガスの燃焼速度がアセチレンの1.5倍、LPガスの2.7倍であり、火炎の集中性が良いことを意味し、狭い範囲の加熱でも十分な熱量が得られるものだと考えられる。

予熱ガスにアセチレンを用いた切断実験は、鋼材用切断火口田中製作所KT2(同心円型)を用い鋼材切断時よりも酸素圧力を増して実施した。(使用した機器の関係で流量の測定は行っていない。)その結果、LPガスと同じ100mm/minの速度で切断可能であることが分かった。また、水素ガスについては、純粋の水素ガスでは炎の調整が難しいため、10%程度の炭化水素を水素に混入して中性炎を着色したηガス(株)鈴木商館製)を利用した。火口は田中製作所製水素用火口3010 X No.2(特殊)である。この場合にも鋼材切断時の切断酸素量より1000ℓ/min増量して切断を試みた結果、切断最大速度は前二者と同じ100mm/minであった。こ

Table 5 切断時の火口温度 ℃

切断材料	LPガス	アセチレン	水素ガス
鋼材	407	79	57
FRP	581	425	326
FRP 水吹付	387	—	—

のように、切断能力に関してはLPガス、アセチレン、水素ガスともほぼ同じ結果が得られ予熱ガスの種類の差は出なかった。

(2) 問題点

前項で述べたようにFRP材をガス切断した場合に生じる主な問題点は次の通りである。

- ①火口直下の切断に時間遅れがあるため炎が下に抜けずに火口側に戻る。そのため火口、トーチが高熱化する。
- ②発火、ガス・臭気・黒煙(煤)が発生する。
- ③切断速度が遅い。

火口、トーチが高熱化すると、ガス爆発の危険を伴うし、作業の際トーチが持ち切れなくなるという問題がある。切断時の火口の温度上昇を熱電対を用いて調べた。その結果をTable 5に示す。LPガスの場合にはFRP切断時に火口温度がかなり高くなっていることが判る。しかし、火口の周辺からFRP材に水を吹き付けた結果、炎のひろがり・戻りが防がれ、火口温

度の高熱化はある程度防ぐことが出来た。また、同表から明らかなように、予熱ガスに水素ガスを使った時が最も火口の温度上昇は抑えられる。これは水素ガスが輻射熱が少ないこと、熱量の消費が少ないことが主な理由であろう。

問題点(2)の黒煙発生・悪臭に関してはFRPを焼き切るためには、ある程度の発生はやむを得ないと考えられる。発生したこれらの二次公害物質を大気中に放散させない目的で水中切断を試みた。使用したガスはLPガスであった。その結果、明らかに発火・炭化域は少なく、発生していると思われる臭気、ガス、煤は水に抑えられて大気中への放散は起こらなかった。

また、当初、FRPを切断する能力はないと考えられていた酸素切断法により9mm板厚FRPを100~150mm/secの速度で切断分離することが出来た。しかし、更に切断速度を向上するためには、予熱ガス流量を増し、与える熱量を増加させる必要がある。しかし、熱量増加に関しては、通常的气体切断では熱量の増加に限界があるため、鉄の燃焼エネルギーを直接利用して切断を行うパウダー切断法あるいは酸素ランス切断法を採用したほうが有利と考えられる。

2.3 パウダー切断実験

2.3.1 実験方法

前述のようにFRPガス切断速度は酸素流量及び予熱ガス流量を出来る限り増加させることにより9mm厚で100mm/min(1本火口)の切断が可能となった。しかし、所期の目標を達成するには更に熱量を増加させる必要があり、熱量増加が確実なパウダー切断及び酸素ランス切断を試みた。

パウダー切断状況をPhoto 6に示す。100メッシュの

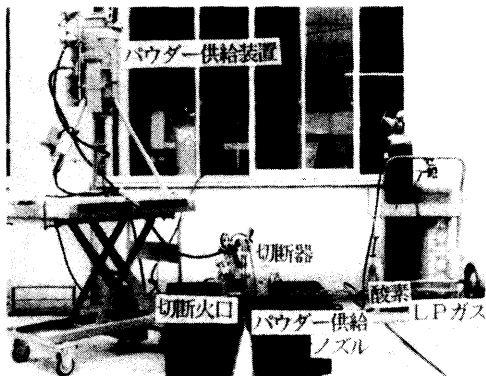


Photo.6 パウダー切断装置

鉄粉を窒素ガスでの搬送により毎分200gづつ自動切断トーチ・火口の外側から供給した。切断条件はTable 4の実験総括表に示してある。

切断実験に供したFRP単板はガス切断に使用したのと同じFRP板(板厚9mm)から切り出した。

2.3.2 実験結果及び考察

(1) 切断性能

実験結果をTable 4に示す。これから明らかなようにパウダーを供給することにより切断速度は通常的气体切断の二倍まで可能になった。通常的气体切断では前述のようにガラス繊維を時間をかけながら一層ずつ吹き飛ばしていくため、平面方向への熱の広がりは大

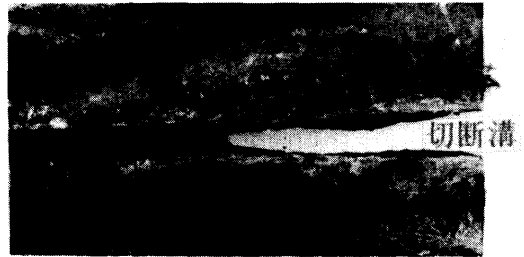


Photo.7 パウダー切断部

きく切断面にはスリバチ状の傾斜がつき、切断幅も大きくなり、切断部上縁と下縁の切り幅の差は50~90mmにもなる。パウダー切断部では切断速度が速いこともあり、Photo 7に示すように平面方向の広がりが少なくかなり直角度が良く、切断部上縁と下縁の切り幅の差は僅かに2~3mmである。また、鉄粉から生じたスラグが切断部近傍に付着するが、容易に剥離することが出来る。火口側表面は発火により全面炭化しているが、裏面側の表面を炎が這った形跡はほとんどない。Table 4に示すように、通常的气体切断並の予熱ガス流量・切断酸素圧でのパウダー切断で9mm厚FRPの最大切断速度は200mm/minであった。

(2) 問題点

パウダー切断を実施した結果、供給装置と切断器の高度差及び窒素圧を利用した供給は供給ホース内での細かい鉄粉の流れに問題があり、パウダーの連続安定供給が技術的に極めて難しいことが判明した。また、今回の実験では、水の吹き付けは行わなかった。従って、発火、黒煙、臭気等の発生に加えてパウダーの飛散がかなり激しく、周囲の環境を著しく悪化させた。ガス切断同様、水を吹き付けるとこれらの問題点はか

なり解消すると考えられるが、湿気によりパウダーのスムーズな供給に悪影響を与えることは必至である。更に、今回のパウダー切断は自動切断で行ったが、実際に廃船を解体する際には手動切断を行う必要がある。その場合には、ますます安定供給が難しくなると考えられる。

2.4 酸素ランス切断実験

2.4.1 実験方法

切断実験に用いたFRP材は基本的には約10mmのものであり、更に、板厚効果を見るために約5、20mmのものも使用した。Photo 8にランス切断実験状況を示す。長さ2~3mのランスパイプの先端を燃焼温度まで予熱して、ランスパイプの中に圧力7kg/cm²の酸素を流す。ランスパイプの先端は燃焼して消耗しながらアークを発生し、そのアークにより手動で切断した。今実験では黒煙発生防止のため試験材にPhoto 8に示すように水をかけた。使用したランスパイプは断面形状の異なる5種類のパイプで、その断面形状をPhoto 9に示す。10F3Nの場合のランスパイプの燃焼速度は600mm/minで1分間に鉄の量にして約950gを燃焼する。これはパウダー切断の場合の4.65倍の量に相当している。

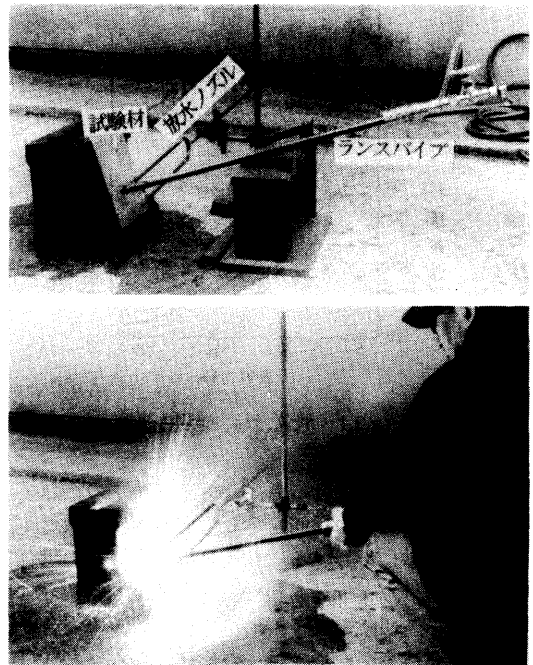


Photo.8 酸素ランス切断状況

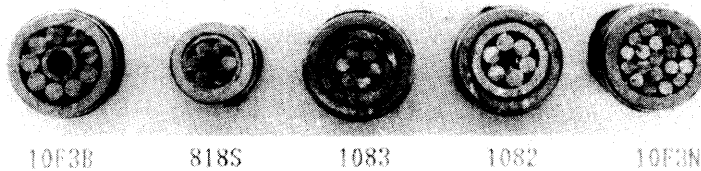


Photo.9 ランスパイプ断面形状

2.4.2 実験結果及び考察

(1) 切断性能

酸素ランス切断部の1例をPhoto 10に示す。手動で切断しているため、パウダー切断部に比べて切断幅等不安定な切れ方を示している。切断部の直角度は通常のガス切断部ほどではないが、パウダー切断部よりかなり悪く、切断部上縁と下縁の切れ幅の差は15mmにもなっている。酸素ランス切断実験で得られた切断速度と板厚の関係をFig. 11に示す。10F3Bは鋼材用に開発されたランスパイプであり、Photo 9に示すように中心部には酸素用通路がある。鋼材の切断では鋼材の酸化熱をも利用するので、ランスパイプ用の酸素以外に被切断材の鋼材用の酸素が必要である。一方、FRP切断の場合には、ランスパイプの燃焼のみに酸

素が使われるので酸素量は比較的少なくて良い。そこで、10F3Bの中心部に鉄骨を入れ鉄量を増した10F3Nを採用したところFig. 11に示すように切断速度が向上し、10mmFRPを270mm/minの速度で切断出来た。



Photo.10 酸素ランス切断部

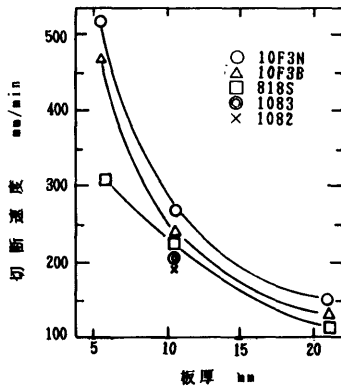


Fig.11 酸素ランス切断速度

板厚が変化した場合にも、ランスパイプの種類による切断能力は同様の傾向を示し、切断速度は板厚が薄くなると急激に上昇する。FRP板厚約5mmの場合には10F3Nで500mm/minを越える切断速度を得た。

酸素ランス切断の場合も、パウダー切断の場合と同様、切断材料裏面に炎が這った形跡は無かった。

また、今回の酸素ランス切断に際しては、実用化を考慮にいれて手で水をかけながら行った。その結果、熱切断では避けられない切断箇所以外の燃焼・発火、黒煙をかなり抑えることが出来た。

(2) 問題点

酸素ランス切断の際には実験室的に水をかけ、FRP表面の発火、黒煙等をかなり抑制出来た。しかし、酸素ランス切断法を実用化するには、現場的に水をかける方法を開発する必要がある。

2.5 まとめ

船用FRP単材の熱伝導特性を調べた後、酸素切断法—ガス切断、パウダー切断、酸素ランス切断—のFRP切断能力並びにその問題点を調べた。その結果、以下のことが判明した。

(1) 熱伝導特性

- ①FRPを構成している不飽和ポリエステルとガラス繊維はともに熱伝導が極めて悪い。FRPの熱伝導率は鋼材より2桁小さい。
- ②温度約400℃程度以上に上げると樹脂は燃焼してしまうが、ガラス繊維は炭化するのみで積層方向へのFRPの熱伝導をさまたげる。
- ③300～500℃では黒煙及び悪臭の発生が著しい。

(2) ガス切断

- ①予熱ガス流量あるいは切断酸素量の増加により切断

(378)

速度が向上する。

- ②9mm厚FRPを100～150mm/secの速度で切断分離出来た。

- ③黒煙が著しく発生する。

- ④黒煙は水の散布により防ぐことが可能である。

- ⑤予熱ガスの種類の違いによる切断能力の差はないが、火口・トーチの高熱化を防ぐために水素ガスが一番適している。

(3) パウダー切断

- ①パウダー切断のFRP切断能力は十分あり、通常の予熱ガス量、切断酸素圧で9mm厚FRPを200mm/min(ガス切断の2倍)の速度で切断出来た。

- ②熱によるFRP材の発火、黒煙、悪臭に加え、供給している鉄粉の飛散が激しく、環境的に非常に問題がある。

- ③平滑な鉄粉の供給は技術的に非常に難しい。

(4) 酸素ランス切断

- ①手動による酸素ランス切断では水を吹き付けて10mm厚FRPを270mm/minの速度で切断出来た。また、5mm厚では500mm/min以上の切断速度を得た。

- ②水の効果により黒煙、発火がかなり抑えられた。

以上の実験結果から、酸素ランス切断法は手動切断が可能であること、水をかけることが可能で、かなり発火、黒煙が抑えられたことを考えあわせると、10mm厚より薄いFRPの切断用技術として十分実用出来ると考えられる。FRP船に使われている板の厚みは船の種類、大きさ等まちまちなので一概に特定出来ないが、一般には6～8mmが多いことを考え合わせると、酸素ランス法は極めて有望である。

3. 爆破による解体の研究

3.1. 空中爆破実験

3.1.1 実験方法

今回の実験に用いた火薬類はFRP切断に適していると考えられる特性の異なった5種類の産業用火薬類である。

特殊特桐ダイナマイト 一般発破用ダイナマイト桐(ニトロ成分20～30%)のニトロ成分を50%とした高爆速、耐水性爆薬。水中あるいは低温用に開発。

アーバナイト 都市や家屋の多い所で使用出来るように開発された低比重低爆速の制御爆破用爆薬、日

Table 6 爆薬の成分及び諸性能

薬種	配合成分 (%)					比重	爆速 m/s	落つい 感度
	ニトロ ゲル	ニトロ 化合物	硝安等	可塑剤	その他			
特殊特綱ダイナマイト	50~54		39~47	2~6		1.50	6700~7200	4級
アーバナイト	50~54	2~6	36~44	2~6		1.30	2000~2500	7級
チタマイト			75~85	3~7	18~22	1.10	4500~5200	8級
シート爆薬		80			20	1.55	7200~7800	8級
導爆線		100				10g/mm	6000~6800	3級

Table 7 爆破切断実験結果

薬種	薬量 g	薬径 mm	爆速 m/s	切断 状況	騒音(dB)		変位速度(kine)	
					20m	40m	20m	40m
特殊特綱 ダイナマイト	20	9.2	5820	×	104	99	0.032	0.0062
	30	11.3	5980	○	106	102	0.068	0.012
	40	13.0	6580	○	107	103	0.089	0.015
アーバナイト	30	12.1	2100	×	105	101	0.052	0.0097
	35	13.1	2280	×	105	101	0.080	0.011
チタマイト	40	14.0	2580	○	106	102	0.069	0.012
	30	13.2	2810	○	105	100	0.038	0.0070
	35	14.2	2980	○	105	101	0.051	0.0080
シート 爆薬	40	15.0	3160	○	106	102	0.058	0.011
	4	3×4	4850	×	102	98	0.023	0.0043
導爆線	8	3×8	7140	○	103	99	0.032	0.0066
	12	6本束	6780	×	105	100	0.064	0.0086
	18	9本束	6670	○	106	101	0.076	0.016

* kine/sec-gal

チタマイト 本油脂製。
油中水型 (W/O型) エマル
ション系含水爆薬。一般の含
水爆薬の弱点の耐衝撃性が向
上。日本油脂製。

RDXシート爆薬 ペンスリット型 (ペンタエリ
スリトールテトラナイトレー
ト PETN) RDX:ヘキソ
ゲン

導爆線 爆薬を心薬として金属、繊維
又はプラスチックなどで、被
覆したもの。ペンスリット

これらの爆薬の成分及び一般的な諸性能を Table 6
に示す。上述のように爆薬の破壊力(爆轟圧)は比重及
び爆速の二乗に比例しているの、比重あるいは爆速
が大きいかほど爆薬の持っている破壊力は大きい。爆速は
一般的に薬径により変化し、同一爆薬でも薬径が大き

くなるにつれて大きくなると言われている。Table 6
に示す爆速はカタログ上の数値であるが、今回の実験
に使用した爆薬は薬径が極端に小さいため、それぞ
れの爆速をカウンター法 (爆轟波の到達時間差を電気カ
ウンターにより計測し爆速を計算する方法) により測
定した。(Table 7) 薬径が小さくなると爆速は小さく
なり、各薬種は各々爆轟しなくなる臨界径を持つ。導
爆線は同一径のものを束にして使用しているので本来
Table 7の測定爆速値は同じになるべきであり、数値
の違ひは測定のパラツキと考えられる。落錐感度は火
薬類の衝撃感度を表しており、数字が小さいほど衝撃
に対して敏感であり取り扱いに注意を要する。数字の
大きいチタマイトとシート爆薬は取り扱い的には比較
的安全である。

これらの各種の特性を持った爆薬を Fig. 12に示す様
に10mm厚のFRP板(切断長200mm×長300mm)に張り付
け(外部装薬発破) 6号電気雷管にブースターとして

5gの特殊特桐ダイナマイトをつけて日本油脂(株)武豊工場内のドーム型実験場内で起爆した。ドーム型実験場の砂地の上に設置した試験直前の試験材の状況をPhoto 11に示す。火薬類の形状は特殊特桐ダイナマイト、アーバナイト、チタマイトについては所定の重量の爆薬を円筒状に成形し、シート爆薬は厚みを3mm—

定とし、幅を変化させた。導爆線は束にして使用した。それぞれの火薬類の実験に使用した薬量と形状をTable 8に示す。

爆破により発生する爆破公害に関しては騒音及び振動について調査した。測定場所は爆源から空中爆破については20, 40mの2測定点でドーム外側に位置して

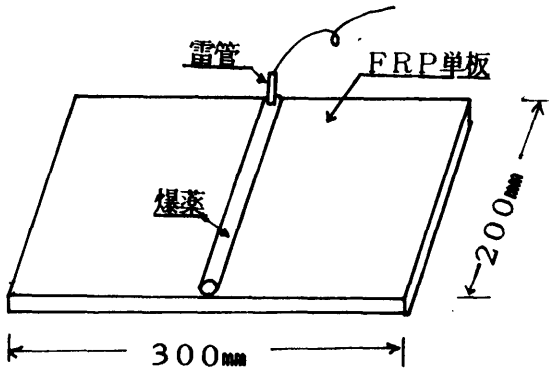


Fig.12 爆薬張り付け方法



Photo.11 爆破実験場

Table 8 爆薬断面形状

重量 高径	4	8	12	18	20	30	35	40
特殊特桐 ダイナマイト					● φ9.2	● φ11.3		● φ13.0
アーバナイト						● φ12.1	● φ13.1	● φ14.0
チタマイト						● φ13.2	● φ14.2	● φ15.0
シート爆薬	■ 3×4	■ 3×8						
導爆線			●●●● 19	●●●●●● 25				

(重量は20cm当たりの重量 (g) である。)

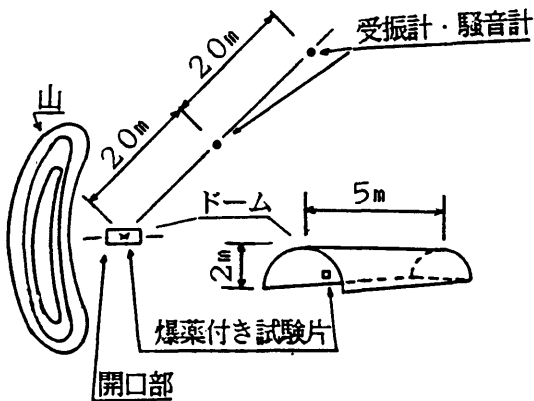


Fig.13 測定位置

いる。(Fig.13) 振動は受振計(鉛直成分)を各測定点の地盤中に地表面から埋め込み(地中10cm)測定し、騒音は地上1mの位置で測定した。使用した受振計は動電型速度計Geo-Space社製GSC-11D型(固有周波数4.5Hz感度0.66/inch/sec)であり、騒音計はRion社製NA-09型(測定範囲30~130dB, 31.5~8000Hz)である。

3.1.2 実験結果及び考察

(1) 各薬種の切断能力

5種類の爆薬について、それぞれの薬量での切断状況及び振動、騒音の測定結果はTable 7に示してある。切断状況で○印は切断、×印は切断せずを示している。切断出来た例と切断出来なかった例をそれぞれPhoto 12, 13に示す。写真ではいずれの場合も層の剝離(写真中で白く見える箇所)が切断位置からかなり離れた位置までみられるが、切断出来ない場合のほうが剝離した箇所が広い。また、切断出来なかった場合には、爆薬張り付け部の反対側が塑性変形によりV型になっている。結局、切断した場合は、積層してあるガラス繊維を切断あるいは引き抜きながら破断し爆薬の持つエネルギーのうち破壊に費やされた以外の残ったエネルギーが切断による材料の分離により解放される。切断されなかった場合には、爆破により発生した衝撃波によりかなり変形したが破壊までのエネルギー不足で破断・分離までには至らず、衝撃波の反射により、ガラス繊維の引き抜き等で剝離しやすくなった層方向に切断エネルギーが費やされたものと考えられる。Table 7の結果を利用して各爆薬の10mm厚FRP板(切断長200mm)切断に必要な最少薬量とその場合の爆速の関係をFig. 14に示す。これから明らかなように切

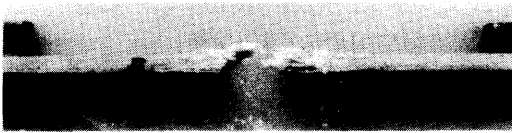


Photo.12 爆破切断例成功
(10mm厚FRP、アーバナイト40g)



Photo.13 爆破切断例不成功
(10mm厚FRP、アーバナイト30g)

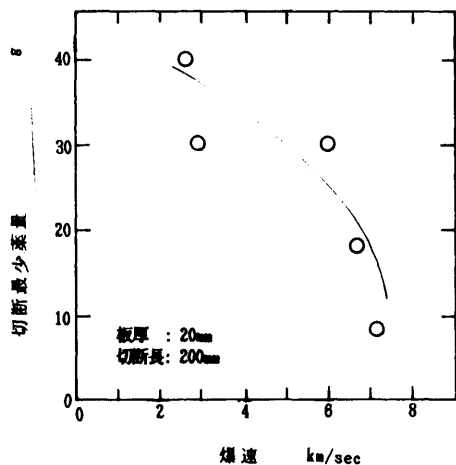


Fig.14 切断最少薬量と爆速の関係

断に要する最少薬量は爆速の高い爆薬ほど少なくなっており、FRP材の切断効果が爆速に関係していることがわかる。

(2) 板厚と薬量の関係

以上の切断能力に関する実験結果と取り扱い性、安全性からチタマイトを選び、板厚の厚いFRP板について切断に要する爆薬量を検討した。実験結果をTable 9に示す。また、同表から求めた板厚と薬量の関係をFig. 15に示す。

鋼板のようなマクロ的に均一な材料の破壊の場合には切断板厚と必要薬量はほぼ比例していると言われている。10mm厚FRPの切断に必要なチタマイトはTable 7に示すように30gであるので、30mm厚の場合は比例計算では90gで切断可能なはずであるが、複合材料であるFRPの場合には明らかに板厚の増加とともに

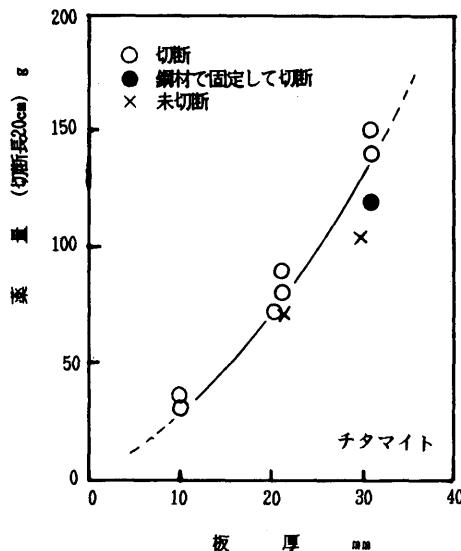


Fig.15 切断最少薬量と板厚の関係

に切断必要薬量は急激に増加する。このことは同表あるいは図から明らかなように、切断に必要な薬量は140gであることが示してある。30mm厚FRP（切断長200mm）を切断分離出来なかったチタマイト105gの場合の爆破後のFRP単板の写真をPhoto 14に示す。写真から明らかなようにほぼ板厚の1/3だけ破断し、しかも残りの部分とは剝離により分離している。破断しない部分もその厚みの中間部が剝離により2つに分離している。結局、剝離にかなりのエネルギーが使われたことがこれより明らかになった。

そこで、FRP板の剝離を防止するため、切断線の両側を鋼板をボルトで挟んで、拘束した状態で爆破切

Table 9 FRP厚みと薬量の関係

爆薬種類	板厚 (mm)	薬量 (g)	切断状況	騒音 (dB)		変位速度 (kine)	
				20mm	40mm	20mm	40mm
チタマイト	20	70	○	108	105	0.100	0.018
	22	70	×		104		
	22	80	○		106		
	22	90	○		106		
	30	105	×	110	106	0.120	0.029
	32	140	○		108		
	32	150	○		109		
	*32	120	○		107		

* 鋼板による拘束

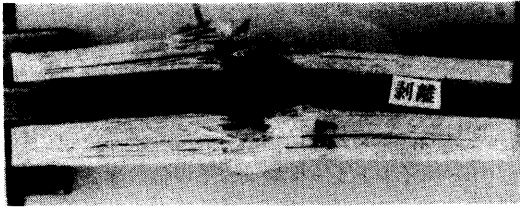


Photo.14 爆破切断例不成功
(30mm厚FRP、チタマイト105g)

断を行った。その結果、30mm厚FRPをチタマイト120gで切断分離出来た。拘束してない場合には140gの薬量が必要であるので、剝離により損失するエネルギーは約15%程度と考えられる。

(3) 爆破振動

実験で得られた振動測定結果も Table 7に示してある。発破の際に発生する地盤振動の推定式は一般に次式で表すことができる⁹⁾。

$$V = K \cdot L^m \cdot R^n$$

- ここで V 変位速度
- K 係数
- L 薬量
- R 距離
- m 薬量指数

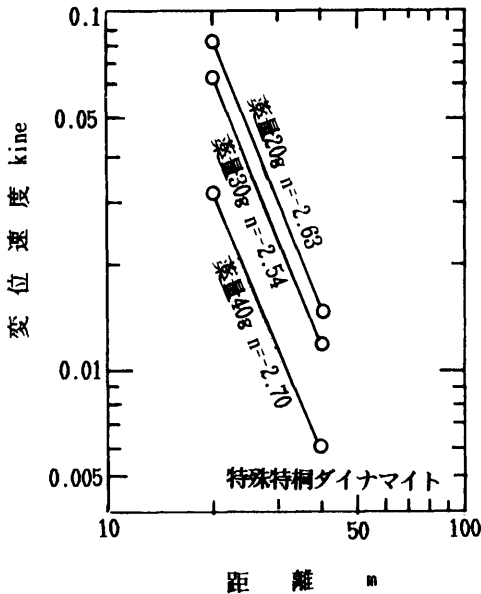


Fig.16 振動の距離減衰

n 距離減衰指数

nは地盤や発破方式に関係する係数であり、またK値は地盤・地形、発破方式、爆薬の種類に関する係数である。今実験は同一場所、同一発破方式で行っているのでn値は一定値を取り、K値は爆薬の種類によって差が出る。今回の実験条件での振動と距離の関係の一例を Fig.16に示す。このグラフから求めたn値を Table 10に示す。nは-2.27~-2.95であり平均値は-2.51となった。n値のパラツキは2点を結んでn値を求めるといった精度の低い求めかたをしたためと考

Table 10 振動減衰指数n値

薬種	薬量 g	n 値
特殊特綱	20	-2.63
	30	-2.54
ダイナマイト	40	-2.70
	30	-2.59
	35	-2.47
アーバナイト	40	-2.46
	30	-2.43
チタマイト	35	-2.71
	40	-2.48
シート爆薬	4	-2.31
	8	-2.46
薄爆線	12	-2.27
	18	-2.95
平均値		-2.51

Table 11 振動のK値 (n=-2.51)

薬種	薬量 g	K 値	
		20m	40m
特殊特綱	20	1109	1224
ダイヤモンド	30	1739	1748
	40	1834	1761
アーバナイト	30	1330	1413
	35	1367	1427
チタマイト	40	1422	1409
	30	972	1020
シート爆薬	35	1162	1038
	40	1195	1291
薄爆線	4	2665	2839
	8	2205	2591
薄爆線	12	3254	2433
	18	2851	3419

えられ、n 値には平均値-2.51を用いた。また薬量係数mは多数の研究のデータを基によく使われている0.75を便宜上使用すると、上式は

$$V = K \cdot L^{0.75} \cdot R^{-2.51}$$

と表すことができる。

この式を使ってK値を計算するとTable 11のようになる。同表が示すように特殊特桐ダイナマイト、アーバナイト、チタマイトの3種とシート爆薬、導爆線の2種とは大きく二分され前者3種は後者2種に比べてK値は1/2~1/3になっており、同一薬量であれば変位速度で表した振動値は小さくなる。しかしながら、前

者3種の爆薬は、切断に要する薬量が多くなるため、切断時における振動発生量は必ずしも小さくない。それぞれの爆薬の切断可能な最少薬量における20m地点での振動値はTable 12に示したようにK値による明らかな傾向は見られない。一方、振動値で比較した場合、チタマイトとシート爆薬がその他の爆薬に比べて1/2程度小さくなっている。

距離減衰指数nは上述のように地盤等に関係した常数であるが、今実験に使用したチタマイト、アーバナイトの製造会社である日本油脂が過去の多くのデータから推奨している一般的なn値は-1.5である。この

Table 12 切断時の振動値

薬種	K 値	変位速度 kine		切断長10m 変位速度が .099以下の地点
		20m地点		
		切断長200mm	切断長10m	
特殊特桐ダイナマイト	1739	0.068	1.278	56m
アーバナイト	1422	0.069	1.297	56m
チタマイト	972	0.038	0.714	45m
シート爆薬	2205	0.032	0.602	41m
導爆線	2851	0.076	1.429	58m

Table 13 振動のK値 (n=-1.5)

薬種	薬量 g	K 値	
		20m	40m
特殊特桐 ダイナマイト	20	54	29
	30	84	42
	40	89	42
アーバナイト	30	65	34
	35	66	34
	40	69	34
チタマイト	30	47	25
	35	56	25
	40	58	31
シート 爆薬	4	129	68
	8	107	62
導爆線	12	158	60
	18	138	82

Table 14 振動のK値 (n=-1.5)

爆薬 種類	薬量 g	板厚 mm	K 値 (kine)	
			20m地点	40m地点
チタマイト	70	20	66	33
	105	30	62	40

値を使って求めたK値をTable 13に示す。

また、板厚の影響を調べた爆破実験でのK値をn=-1.5として求めるとTable 14のようになる。この値はTable 13のK値とほぼ似た数値であり、薬量が多くなってもK値には影響しないといえる。

変位速度で表わした振動値と人体、構造物の被害度との一般的な関係をTable 15に示す。今回の実験は切断距離が200mmと短いため必要薬量が極めて少なく、得られた振動値は振動源が20mの近接距離でも高々0.076kineとほとんど人体に感じられない程度である。しかし、実際に廃船を解体する際に胴体の輪切りを一度に行うとすると、一度に5~10mの長さの切断を行う

Table 15 地震の気象庁震度階と変位速度

震度階	概 容	最大加速度 g	(備考) 変位速度 kine
0 無 感	人体に感じないが普通の地震計に記録される程度	0.8以下	0.032以下
I 微 震	静止している人、地震に特に敏感な人の感じる程度	0.8~2.5	0.032~0.099
II 軽 震	一般の人が感じ、戸障子がわずかに動く程度	2.5~8.0	0.099~0.32
III 弱 震	家屋の動き、戸障子が鳴り、振り時計が止まり、電燈のよう な吊下物が揺れ、器の中の水面が動くのがわかる程度	8.0~25	0.32~0.99
IV 中 震	家屋が激しく動き、器の中の水がはねあがり、軽い書物 入った箱の中の水がはねあがり出る程度	25~80	0.99~3.2
V 強 震	家屋が激しく動き、書物、右燈ろうなどが倒れ煙突や土蔵 などに破損ができる程度	80~250	3.2~9.9
VI 烈 震	家屋が倒れ、山崩、崖崩などが起り、平地に亀裂ができる 程度	250~400	9.9~16
VII 激 震	建物がほとんど破損し、物体が放り出され、地平線に液状 の変化が見られる程度	400以上	16以上

事になる。切断長さが10mのときの20m位置での変位速度及び人体に感じられなくなる変位速度が0.099kine以下になる爆源からの距離を計算から求めた結果をTable 12に示している。20m位置での変位速度は0.602~1.429kineと比較的大きいが、人体に感じられなくなる距離が45~58mであり、法定管理区域が30mであることから、空中張り付け発破による廃船の解体では振動に関しては問題は無いといえる。

(4) 爆破騒音

Table 7には今回の実験で得られた騒音測定結果も示されている。火薬類が空中で爆発すれば、爆源に近いところでは衝撃波が発生するが、ある距離離れば音波として伝播する。Table 7の結果からは20m地点と40m地点との距離減衰は4~5dB、平均値は4.3dBとなった。また、薬量効果については2倍薬量で3dB程度である。一方、薬種による騒音の差はほとんど見られず、どのような爆薬を使用しても薬量と距離についてのみ検討すればよいものと考えられる。上述のように実際に廃船を解体する際には、一度に5~10mの長さの切断を行う事になる。それに必要な薬量はおおよそ5kg~20kgとなる。公表されている張り付け発破の際に発生する騒音の測定例をFig. 17¹⁰⁾に示す。距離減衰は-6dB/(2倍距離)、薬量減衰は3dB/(2倍薬量)であり今回の測定結果とほぼ一致している。Table 16¹¹⁾には音圧の人体への被害の関係を示す。Fig. 17では20kgの爆薬を使用した場合、爆源から500mまでの距離での騒音は120dB(500m地点)~145dB(起爆点近辺)となっている。爆発音は単発音であるので幾分かは割り引いて考えても良いが、500m離れた位置でも“痛感を受ける”レベルの音であり問題が残る。また、Fig. 17から求めた薬量50g、距離32mでの騒音は116dBであるが、本研

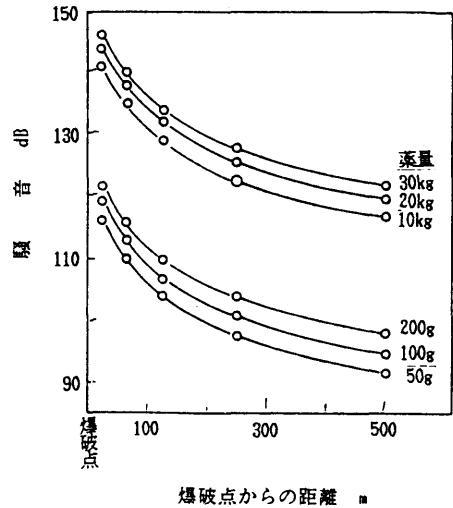


Fig.17 爆破音と距離の関係

Table 16 音圧と人体の生理的被害の関係

音圧レベル(dB)	音圧(g/cm ²)	被害の程度
150	6.3	瞬時にして聴覚を失う
120	0.2	痛感を受ける
100	0.02	長時間にて難聴
80	0.002	安全域

究で使用したドーム型実験場において50gの薬量を爆破し32mの地点で測定したところ106dBとなった。音の大きさは気候、地形等各種環境条件に敏感に影響されるため断定することは出来ないが、爆発ドームの消音効果が10dB程度であると推定される。

(5) 重ね切断

実際のFRP船殻は、老朽化にともないFRP板が剝離して内部に空気層が出来ている場合が想定されるため、5mm厚（切断長さ200mm×長さ300mm）のFRP板を2枚重ねてその間に隙間を作り爆破切断し、10mm厚のFRP板との相異点について検討した。実験結果をTable 17に示す。同表からわかるようにFRP板に

Table 17 重ね切断実験結果

FRP板			薬量	切断状況	
1枚厚 _{mm}	枚数	空隙 _{mm}	g	上側	下側
10	1	無	30	○切断限界	
10	1	無	35	○	
5	2	0密着	35	○	×
5	2	1	35	○	×
5	2	0密着	50	○	○
5	2	1	50	○	×

空隙が出来た場合には、例えば見掛け上密着していても(35g/30g)倍の薬量では上側しか切断されない。(50g/30g)倍の薬量では密着の場合には上下とも切断され、空隙が1mmあれば上側しか切断されない。このようにFRP板に、剝離のようなわずかの空隙があっても、その空隙で爆薬の切断エネルギーが喪失し一体となったFRP板よりも多くの爆薬を必要とする。また、FRP板の厚みが大きくなった場合に剝離を起こし、多量の爆薬を使用しても切断されにくいことは上記と同様の現象が爆轟時に発生し、あたかも空隙のあるFRP板を切断したようになってしまうことが原因である。

3.2 水中爆破切断実験

3.2.1 実験方法

空中爆破時の騒音を軽減する目的で水中爆破を試み、水中爆破の問題点を明らかにした。水中爆破実験は騒音、振動、並びに爆破により生じる水柱の大きさを計測することを目的としたので、FRP材への張り付けは行わず爆薬のみを水中に入れ爆破した。材料に張り付けた場合の、材料の破壊に費やされる爆破エネルギーは全体の1～2割であり、残りは空中あるいは水中に発散され、材料の振動音とともに音として伝播する。

水中爆破実験に用いた薬種は空中爆破実験の結果、FRP材切断に最も適していると考えられるチタマイ

トを用い、薬量及び水深による騒音、振動、水柱の大きさの変化を調べた。薬量の影響を見るために水深2mの位置で各々100、200、500gのチタマイを爆破した。また、水深の影響を見るために100gの爆薬のセット位置を水深0.3、0.5、1、2、4mと変えて起爆した。

実験は日本油脂(株)武豊工場内水中爆破実験場(池)で行った。騒音・振動は空中爆破実験と同じ計器を用いて計測した。計測位置は騒音は爆心より20並びに40mの位置(地上1.5m)、振動は20、40、60m(地下1m)である。また、水柱については36mmフィルムによる連続写真から実測した。

3.2.2 実験結果及び考察

(1) 水柱

水中爆破時の水柱の状態を連続写真に撮った。その一例をPhoto 15に示す。この連続写真から水柱の最高高さを計測した。その結果は水中爆破実験結果Table 18に示してある。水柱高については、当然のこ

Table 18 水中爆破実験結果

水深 m	薬量 g	騒音(dB)		変位速度(kine)			水柱高 m
		20m	40m	20m	40m	60m	
2	100	85	78	0.75	0.22	0.14	1.6
	200	88	81	0.68	0.32	0.16	4.3
	500	92	85	1.47	0.41	0.25	5.7
0.3	100	88	85	0.35	0.11	0.088	15.4以上
1.5		88	85	0.44	0.13	0.082	5.5
1		86	81	0.58	0.16	0.098	4.1
2		85	78	0.75	0.22	0.14	0.6
4		84	75	1.10	0.35	0.25	0.1

とながら薬量が増加、あるいは水深が浅くなるにつれ大きくなるが、水深2m、薬量500gでも5.7mしか上昇しない。また、水柱高と水深の関係については薬量100gであっても水深を浅くすると(0.3m)と数10mの上昇し、水深が極めて浅い場合は、上方にぬけるエネルギー比率が急激に増加するようである。しかし、0.5m沈めると急激に水柱高が低下し、ある程度水深があれば水柱は防止しうるといえる。しかし、水柱自体は発生したとしても特に公害的な問題は無い。しかし、水柱が立つことにより、水中を伝播する衝撃エネルギーが水柱が大きいかほど空中に音として発散されるため、騒音に関しては問題がある。

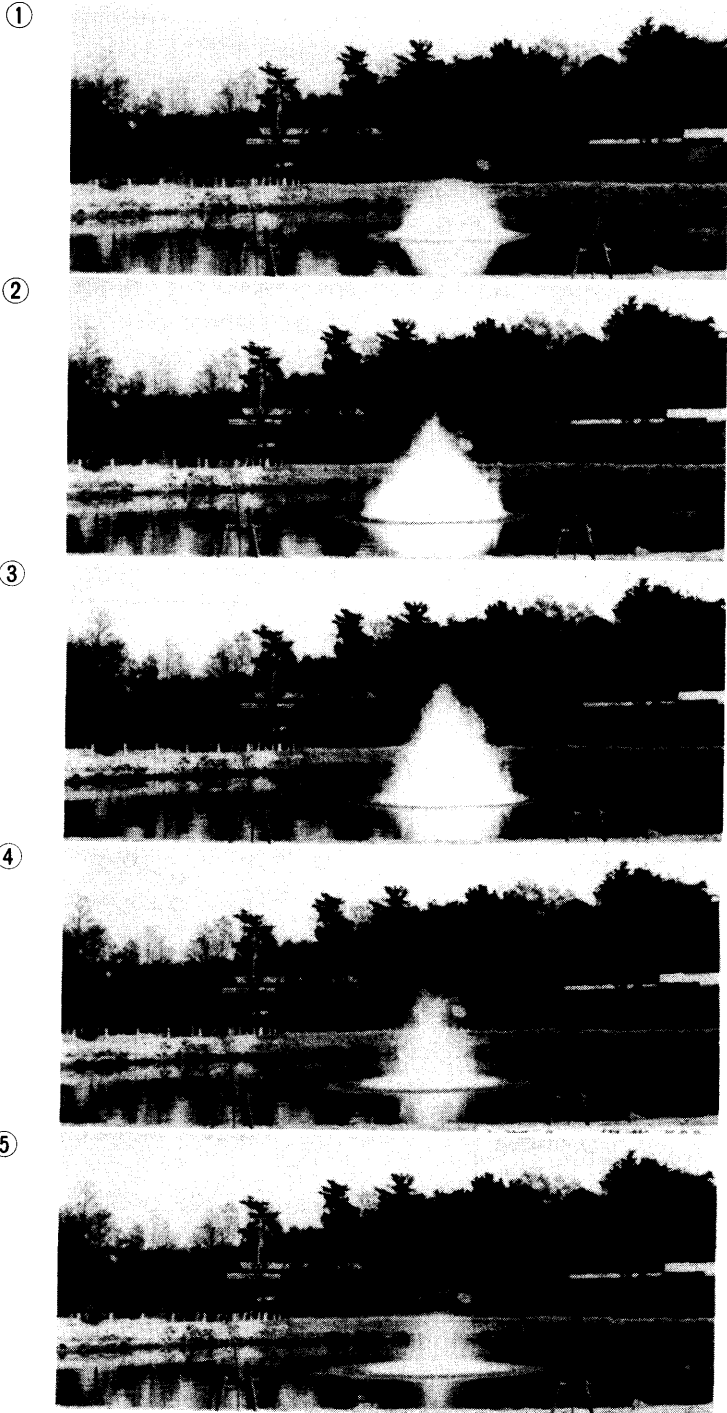


Photo.15 水中爆破による水柱発生状況

(2) 水中爆破騒音

騒音と水深の関係を Fig. 18に示す。水深が深くなるにつれて騒音は小さくなるが、水深0.5mと0.3mではほぼ同一の値であり、0.3m程度の水深があれば十分な消音効果は期待できる。また、空中爆破実験の105gの騒音は110dB (20m), 106dB (40m) であり、水深0.3mでの騒音88dB (20m), 85dB (40m) と比べて約20dBの消音効果がある。更に、空中発破音はドーム内で起爆しており、前述のドームによる消音効果10dBをあ

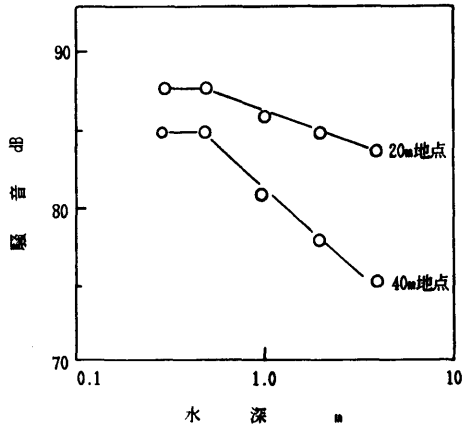


Fig.18 水中爆破の騒音と水深の関係

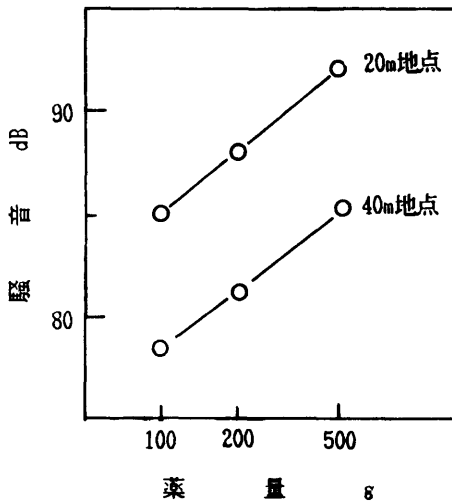


Fig.19 水中爆破の騒音と薬量の関係

わせて考えると、水中での消音効果は30dBであり、消音効果は非常に大きい。

薬量と騒音の関係を Fig. 19に示す。騒音と薬量の間には3dB/(2倍薬量)の関係があり、空中音の場合と同じ結果となっている。実際に、FRP廃船を爆破切断により解体する場合には、前述のように5~20kgの薬量を同時に起爆する。3dB/(2倍薬量)の関係から20kgの爆薬を起爆した時の爆音を計算すると起爆点から20m地点で108dBとなる。空中爆破切断の項で示したように爆音の距離減衰は6dB/(2倍距離)であるので、20kgの爆薬の爆音は起爆点から40, 80, 160, 500m地点で各々102, 96, 90, 80dB程度と推定される。このレベルの騒音は、単発音であることでもあり問題は無い。

(3) 水中爆破振動

振動と水深の関係を Fig. 20に示す。騒音の場合とは正反対に、水深が深くなるにつれて振動は大きくなる

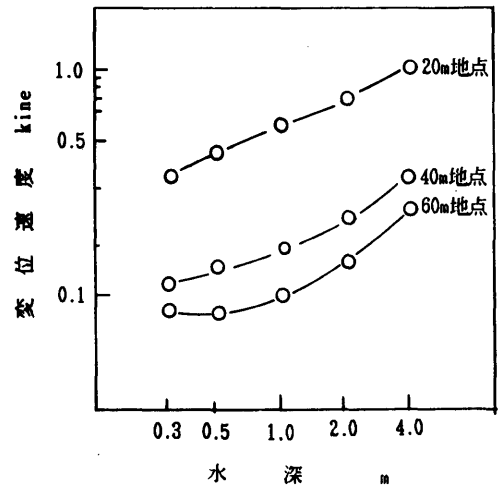


Fig.20 水中爆破の振動と水深の関係

る。水深と振動速度の関係は一般に次式で表される¹⁰⁾。

$$V = KD^n$$

V 変位速度 (kine)

K 定数

D 水深 (m)

n 水深指数

n = -1.5として水中発破における振動のK値を求めると Table 19のようになる。同表から明らかなように、水中発破の振動のK値は Table 13, 14に示した

Table 19 水中爆破の振動のK値

水深 m	薬量 g	K 値		
		22m	40m	60m
2	100	435	313	366
	200	235	271	249
	500	255	174	195
0.3	100	203	156	230
0.5		255	185	214
1		337	228	256
2		435	313	366
4		638	498	653

空中張り付け発破のK値よりも大きな値となる。これは水中発破の場合には、騒音は水中に封じ込められて小さくなるのに対して、振動は、爆薬の持つエネルギーが水中衝撃波エネルギーとバブルエネルギーとして水に伝播され、さらに地盤に伝播することにより振動として消費される比率が高くなるためである。

振動と薬量の関係を Fig. 21 に示す。20m 測点の200g のデータがバラツいてはいるが、傾向的には薬量の増加に伴い振動は大きくなる。変位速度と薬量の関係は

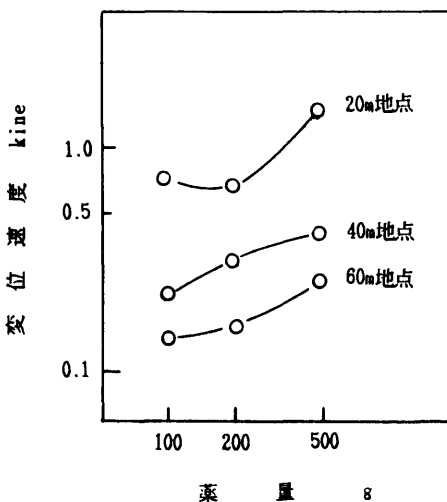


Fig.21 水中爆破の振動と薬量の関係

一般に次式で表される¹⁰⁾。

$$V = K \cdot L^m$$

ここでV 変位速度 (kine)

K 定数

L 薬量 (kg)

m 薬量指数

この式から、100gと500gのデータを用いて薬量指数mを求めると0.42(20m地点)、0.39(40m)、0.36(60m)でその平均値は0.39となる。FRP廃船の解体を行う場合の同時に起爆する爆薬量は前述のように5~20kgであるので、20kgを起爆したときの変位速度を上式とTable 18から計算すると、20m地点で6.19kine、60m地点で1.05kineとなる。この大きさの変位速度はTable 15に示す震度階では中震~強震に相当し、近辺の住民から大きな苦情がきたり、構造物等に被害が出る可能性がある。

(4) 問題点

空中爆破の騒音を解消する目的で水中爆破を試みた結果、水の消音効果が30dB程度あり、騒音に関する問題点は解消した。しかし、空中爆破で殆ど問題が無かった爆破振動は激増し、爆破切断法のFRP船廃船解体技術としての実用化には水中爆破振動を軽減する必要があることが判明した。しかし、過去の軽減対策の実例¹¹⁾から推測して現在検討中の次の方法により、振動を十分抑制出来ると考えられる。

- (1) 空気泡・空気カーテンによる衝撃波のエネルギーの減少。
- (2) 吸振材による振動の減少。

また、爆薬の切断箇所への張り付けはゴムテープで行う。水中でのゴムテープの張り付けは非常に困難であるが、張り付けたあとで水の中へ廃船を沈めるか、注水することにより問題は無い。

実際に水中爆破に使用するために爆薬に要求される仕様は

- (1) 耐水圧性
- (2) 不発の場合、経日変化により性能が劣化すること
- (3) 水中殉爆性 (一つの爆薬塊が爆発した時、水を隔て他の爆薬塊が感応爆発する現象)、水中伝爆性が良いこと

- (4) 比重が大きいこと

等であるが、今回用いた爆薬については上記の仕様は完全に満足していて問題はない。

3.3 まとめ

FRP廃船の解体技術として切断能力、安全度、価

格、環境への影響の観点から爆破切断法が適しているかどうかを調査するために、5種類の産業用火薬類—ダイナマイト系の特殊特種ダイナマイト、アーバナイト、含水爆薬チタマイト、高爆速の爆薬としてRDX製シート爆薬、並びに導爆線（ペンスリット）—によりFRP単板の空中爆破切断実験を行い切断能力、及び爆破により発生する騒音、振動について調査を行った。その結果をもとにFRP切断に最適の爆薬の選定を行った後、水中爆破を試みその問題点を明らかにした。

(1) 空中爆破切断

- ① 各爆薬ともFRP切断に十分な能力を有する。
- ② 切断エネルギーが層間剝離に多く使われるため、FRPの板厚が厚くなるほど切断に必要な最少量は急激に増加する。
- ③ 騒音についてはかなり問題が有ることが判明した。
- ④ 今回試みた爆薬の中では、切断能力、環境への影響、安全度からはチタマイトがFRP切断に適している。

(2) 水中爆破

- ① 水の消音効果が30dB程度あり、水中爆破により騒音に関する問題点は解消する。
- ② 空中爆破で殆ど問題が無かった爆破振動は激増する。

結局、空中爆破では騒音、また、水中爆破では振動が問題にはなるが、振動のほうが技術的に軽減しやすいので、FRP廃船解体には水中爆破切断が適しており、十分実用出来るものと考えられる。

4. あとがき

FRP船廃船処理システム確立のための第一段階として、酸素切断法及び爆破切断法が解体技術として利用出来るか否かについて、主に切断能力と環境破壊の観点から検討した。その結果、両技術とも十分実用できることが判明した。

酸素切断法については、水をかけたの酸素ランス切断が切断能力並びに黒煙発生観点から最適であり、現在進行中の水の散布技術の開発により実用化されると考えられる。

爆破切断法については、水中爆破振動の抑制が解体技術への実用化に欠かせない点であるが水中爆破法が廃船解体に適しており十分実用化出来ることが判った。

最後に爆破実験の遂行に際し、多大な助言並びに実験協力を頂いた日本油脂(株)発破技術センター黒川主任

はじめETグループの皆様には厚く感謝の意を表します。

5. 参考文献

- 1) プラスチック産業資材新聞；昭和59年3月15日
- 2) 水産庁漁船統計表，1985，及び舟艇工業会調べ
- 3) 水産庁漁船統計表，1985
- 4) “FRP廃棄物に関するアンケート調査結果について”，強化プラスチック，p488，Vol.29，No.11
- 5) 溶接学会編；溶接用語事典，産報，p73，1981
- 6) 甲藤好郎；伝熱概論，養賢堂，p6，1967
- 7) 林，波江，永松，吹上；FRP船廃船処理技術に関する研究，61年度環境庁成果報告集
- 8) 鈴木商館；“溶断ガスとしての水素ガスについて”，日本溶接協会委員会資料
- 9) 石井康夫他；発破技術，森北出版，p157，1980
- 10) 黒川孝一；発破音について，日本油脂技術資料
- 11) 飛石，振動，発破音について，日本油脂技術資料No.1
- 12) 総合安全工学研究所編；水中発破，山海堂，p155，1985
- 13) 木村真；発破用語事典，白亜書房，1983

6. 付 録

6.1 船用FRP

繊維強化プラスチックFRPはガラス繊維を樹脂で固めたものである。船用FRPに使用される樹脂は熱硬化性樹脂である不飽和ポリエステル樹脂であり、Table 20に示すようなガラス繊維及び不飽和ポリエステル樹脂の持つ長所を組み合わせることで各々の欠点を補い、軽くて強度の高い耐薬品・耐腐食性の材料になっている。不飽和ポリエステル樹脂のFRPを使用した製品としては、船以外では水のタンク、浴槽が代表的である。

Table 20 ガラス繊維と樹脂の特徴

	ガラス繊維	ポリエステル樹脂
長所	高引張り強さ	成型性、接着性
	高弾性率、伸び小	耐薬品性、耐水性
	柔軟性 不燃性	電気絶縁性、着色性
短所	電気絶縁性、耐薬品性	
	風化性、曲げに弱い	伸び大、可燃性
	摩耗に弱い	強度小

ガラス繊維はチョップドストランドマットMとローピングクロスRとが交互に使用されるMR構成が一般的である。チョップドストランドマットは無アルカリガラスのストランドを適当な長さ(約50mm)に切断し無方向に積み重ね、結合剤を用いてマット状にしたものである。また、ローピングクロスは、適当な繊維径(13~17 μ)を持った無アルカリガラス繊維を収束剤を塗布しながら収束したストランドまたはローピングを用いて製織した平織、羽耳織物である。

6.2 熱切断

熱を用い、材料を局部的に溶融して切断する方法を総称して熱切断という。熱切断法の一方法である酸素切断法では噴流状の高純度酸素と高温に予熱された金属との酸化反応により、母材を局部的に燃焼、溶融させ、酸化、溶融金属を酸素噴流の機械的エネルギーにより除去することにより材料を切断する。酸素切断法の中ではガス切断法が最も一般的で、鋼材の切断に多く使用されている。

FRP材を酸素切断する場合には単に酸素切断法の有する熱エネルギーのみで材料を溶融切断せざるを得ない。しかし、FRP材はそれを構成しているポリエステル樹脂及びガラス繊維が不良熱伝導性であるため、与えた熱が伝わり難く局部的燃焼に止どまり、熱による溶融切断は極めて難しい。更に、炎が材料表面を這うため表面のプラスチックが燃焼し黒煙を発生する。結局、酸素切断法を含めて熱切断法では加工物の変質、炭化、さらには黒煙・有毒ガス等の発生が嫌がられて、いままではFRPや各種プラスチックの切断には利用されていなかった。

ガス切断

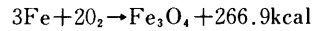
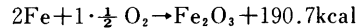
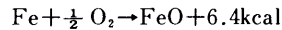
ガス切断法は酸素切断法の中で最も一般的な切断法で、鋼材の切断方法として最も代表的で広く使われている。鋼材においては予熱炎で加熱した箇所へ切断酸素を噴射し、金属と酸素の急激な化学反応熱によって、溝状に金属を酸化溶融し、酸素噴流の機械的エネルギーにより溶融金属を除去して行う切断である。FRP材の場合には高熱の酸化反応が起こらないのでガスの燃焼熱を利用してFRPを高熱化・溶融させることにより分離することとなる。

パウダー切断

パウダー切断は一般のガス切断の火炎中に鉄粉末を自動的かつ連続的に切断部に供給して、その酸化熱及びフラックス作用を利用して行うガス切断法で、通常ガス切断では困難または不可能な材料の切断に用い

られている方法である。FRPの場合には構成している樹脂あるいはガラス繊維と酸素との酸化熱の利用は出来ない。従って、予熱ガスの熱エネルギーとパウダー(鉄粉末)の酸化燃焼熱を利用することとなる。

鉄と酸素の化学反応は



である。

酸素ランス切断

酸素ランス法は先端を予熱した鋼管類のような金属管に酸素を送給し管の先端を燃焼させ、その熱と酸素噴流の作用によって連続的に孔を明け切断する方法で、大きな鉄の塊の穿孔や切断に最も古くより行なわれていた酸素切断法である。この方法は、切断部に大量の熱を発生させ、ランスパイプまたは切断気流の当たる部分を燃焼温度に予熱して行なわれるので、常に切断・穿孔の原始的な方法と見なされてきた。酸素ランス切断における燃焼点がトーチによる切断(ガス切断、パウダー切断)のようにはっきりしていないので切断面は粗雑である。従って、鋼材の切断に利用される場合には廃材処理法一例えば工事現場での鋼管矢板、鋼矢板の切断除去として限定されてきた。しかし、酸素ランスによる切断はランスパイプの燃焼エネルギーを利用している。従って、コンクリートのような不燃性の物質に対しても、パイプの反応熱で溶解し気流の力で吹き飛ばして切断・穿孔を行うことができる。FRPを酸素ランス切断する場合にも、ランスパイプの酸化熱を利用して樹脂を燃焼し、酸素気流によりガラス繊維を吹き飛ばし分離切断することになる。

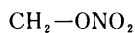
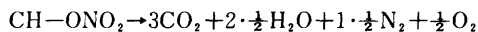
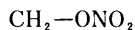
6.3 爆破切断

1867年 Nobelによりダイナマイトが発明されて以来火薬類は軍事用、産業用として使用されてきた。従来エネルギー及び資源の確保・国土開発・海洋開発等の目的に使われていた産業用爆薬を使用した爆破法は、機械掘削に比べて経済性、作業効率の面で優れていることもあり、その発破公害(飛び石、振動、騒音)を抑制する技術の進歩とともに、近年は山間部、海洋、僻地のみならず市街地でも道路建設、地下鉄工事等に利用されている。欧米で盛んに行なわれている建築構造物全体の爆破破壊に関しては、我が国としては昭和61年3月6日に初めて科学万国博覧会のパピリオン“国連平和館”の取り壊しに含水爆薬300kgが使われた。また、通商産業省では現在建築構造物の爆薬による破

壊基準の作成を急いでいる。

事典¹³⁾によると、火薬類とは不安定な平衡状態にある固体または液体あるいはこれらの混合物で、この一部に熱または衝撃を加えた時、急激な化学反応を起こして、多量の気体または熱を発生するものをいう。火薬類は法規的には火薬、爆薬、火工品に分類される。火薬は爆発力によって物体を推進させるために用いる火薬類であり、爆薬とは破壊的爆発の用途に供する火薬類をいい、武器に装填するものを炸薬、産業用に供せられるものを爆破薬、起爆に用いるものを起爆薬という。火工品とは火薬類を使用目的に応じて繊維やプラスチックで被覆、あるいは筒や管に装填して加工したものの総称である。火薬類に関する法規には火薬類取締法があり、火薬類の製造、譲渡、譲受、輸入、貯蔵、消費、廃棄などを規制することにより、火薬類による災害を防止し、公共の安全を計っている。また同法では、火薬類の貯蔵または消費に関する保安について監督を行わせるため火薬類取扱保安責任者をおくことと規定している。

爆薬の爆発効果は静的効果（仕事効果）の動的効果（破壊効果）に分けられる。静的効果は爆薬の爆発によって生成した多量のガスが高温によって更に膨張し、周辺に及ぼす激しい推進的作用に起因する効果であり、体積膨張がエネルギーとなる。例えばニトログリセリンは化学反応により



となる。このガス膨張により10万気圧にもなるといわれている。

動的効果は、爆薬が爆発した時発生する衝撃波が周辺に及ぼす力による効果である。火薬類が分解反応するときには火炎を伴うが火炎の伝播速度が媒質中の音速より速くなると、火炎面の直前に圧力の不連続な隆起を伴う衝撃波が生じ反応速度が著しく速くなる。この現象を爆轟といい、爆薬の爆轟圧（動的エネルギー）は一般に次式で表される。

$$P = \left(\frac{1}{3}\right)\rho Dv^2$$

ここで、P 爆轟圧

ρ 爆薬の密度

Dv 爆速

即ち爆轟圧は爆薬の密度及び爆速の2乗に比例する。爆轟は衝撃波を伴った燃焼反応であり、その反応部分は先行する衝撃波と同じ速度で爆薬の中を伝わる。これを爆轟波といい、爆轟波の速さが爆速である。

爆薬の威力は上記の静的効果と動的効果の和であるが、FRPを含め材料の切断の場合には、ガス膨張による静的エネルギーよりも爆轟圧による動的エネルギーが有効に作用されると考えられる。

爆破に伴って発生する問題点としては、爆破切断対象物の飛散、後ガス、爆風、騒音、振動がある。それらの防止対策は使用状況に応じて種々研究、検討されかなり抑制されてはいるが、現時点では問題点を完全に解消するまでには至っていない。