

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「超音波振動を付加したウォータージェット切削システムの開発」

研究開発成果等報告書

平成22年 5月

委託者 中部経済産業局

委託先 財団法人 名古屋産業科学研究所

目 次

第1章 研究開発の概要	
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標.....	4
1-1-1 研究の背景.....	4
1-1-2 研究の目的及び目標.....	5
1-2 研究体制.....	6
1-2-1 研究組織と管理体制.....	6
1-2-2 事業管理者及び研究者等氏名.....	7
1-2-3 アドバイザー.....	8
1-3 成果概要.....	8
1-4 当該研究開発の連絡窓口.....	10
第2章 本論（研究開発の成果）	
2-1 高効率ノズルの設計と製作.....	11
2-1-1 数値流体力学を用いたノズル形状の決定.....	11
2-1-2 ノズル形状の実験的検証.....	15
2-2 WJ専用超音波振動子の開発.....	20
2-2-1 超音波振動子の開発と既存ノズルへの適応.....	20
2-2-2 繰返し衝撃力発生による切削性と貫通力の向上.....	25
2-2-3 ハイスピードカメラを用いた可視化（流れと切削現象）.....	27
2-2-4 最適振動数と振幅の検討.....	28
2-2-5 管内圧力計測とキャビテーションの存在有無.....	32
2-3 実用化への評価.....	34
2-3-1 取り付けとメンテナンス性の検討.....	34
2-3-2 産業用ロボットの動作への影響.....	35
2-3-3 無負荷状態で産業用ロボットへ取り付けての動作確認.....	35
2-3-4 負荷状態で産業用ロボットへ取り付けて連続切削実施.....	35
第3章 全体総括	
3-1 まとめ.....	36

3-2	研究開発後の課題・事業化展開.....	38
3-2-1	課題.....	38
3-2-2	事業化展開.....	39
補足		
1	参考文献.....	40
2	脚注.....	41

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究の背景

1) ウォータージェット切削技術の特徴と課題

ウォータージェット(*1) (以下「WJ」と省略) 技術は、高圧水流の衝撃力を利用した切削加工技術であり、通常の工作機械を用いた加工、レーザー加工やプラズマを用いた加工等と比べて、①自動化・ロボット(*2)化が容易、②熱・粉塵・有毒ガスの発生がなく、火災や切削部周辺への熱影響の心配がない、③非接触切削のため切削面が綺麗、④曲線切削が可能等の利点が挙げられ、現在、樹脂、布、ガラス、不織布、食品、石、鉄・非鉄金属など各種材料の切削加工に用いられている。しかし、切削能力はビット、バイト等の工具による機械的切削法に比較してエネルギー効率も高くなく、消耗品寿命や消費電力、切削に利用する上水などランニングコスト、高圧水噴射時の騒音等の課題について解決が望まれてきた。WJ技術で用いられる噴流は切断やせん孔や材料除去など各種加工に関する応用研究が行われつつある。また、既存の方法では困難な加工、あるいは布、ガラス、複合材料、セラミックス、難削材料などの加工困難な材料への適用が図られている。さらに、ノズル(*3)の微小口径化等によって従来と比べて切削しるを大幅に小さくした切削システムも求められている。

2) 自動車分野における課題とニーズ

自動車分野における切削加工において既存WJシステムは、非接触の切削方法であり水の進行方向に制約がないといった特徴から、複合材(*4) (天井材、カーペット等)の切削に採用されている。しかしながら、自動車部品メーカーの切削現場では、①超高压水による配管シール部の消耗頻度が高い、②WJポンプの使用電力量が多い、③WJ稼働時の水使用量を削減したい等のランニングコスト低減が課題となっている。また、超高压水の噴射音による騒音や、超高压水噴射による飛散汚れの改善などの環境に対する配慮も課題とされる。これらの課題を解決するためのニーズとして、より少ない圧力・水量で切削可能な高効率WJシステムの開発が求められている。

3) 電気機器分野の抱える課題・ニーズ

性能・寸法の再現性向上

電気機器に必ず組み込まれている電子基板は、通常、主にロータリー刃によって切削している。ロータリー刃は直線的な切削しか行えないため、電子基板の切削面は直線しか持ち得ない。

さらにロータリー刃は切削時の摩擦により熱が発生するため、切削時に基板のレアメタルを歪ませる不良を出してしまう。この摩擦熱による加工不良率が高く、切削段階での材料ロスの低減が課題の一つとなっている。また、携帯電話等小型電子機器分野では電子基板の曲線切削のニーズがある。曲線切削にはレーザー切削とリユーター切削の方法があるが、両工法とも切削時に熱が発生し、基板のレアメタルを歪ませる。曲線切削ではリユーター切削が一般的であるが、リユーターの細化と切削能力は技術的に限界に来ており、切削しろと切削速度に問題がある。またWJは熱を発生せず、切削速度が速いという長所はあるもののやはり水流幅が太く、基板の主素材(エポキシ樹脂)切削時の切削しろが広くなり、曲線でも切削可能、かつ電子基板を切削するのに十分な条件を満たす切削方法がないのが現状である。

これら既存の金属刃による切削技術等では困難な加工方法・難削材料の切削に対して切削能力を向上させつつ微小口径化させたWJ技術を適用することにより、これらの問題が解消され、電子基板の寸法の再現性を向上させる可能性がある。

1-1-2 研究の目的及び目標

本研究では、電歪型加振ノズルの原理を利用しつつ、WJ超高压水に超音波振動を付加しその衝撃力を向上させることにより切削能力の向上を図るための高効率専用ノズルの開発及びWJ専用超音波振動子の開発を行い超音波振動式WJシステムの実用化へ向けて開発を行う。

具体的には、電歪型加振技術の応用、WJ内の速度・圧力変動やノズル形状の評価、可視化実験から実機試験に至る一連のWJシステムに必要な切削効率、消費電力の低減や低水压切削などを含めて実験及び数値流体力学計算の両面から調べ、超音波振動式WJシステムの開発と評価を行う。

なお、研究開発に際して、次の通り技術的目標値を設定した。

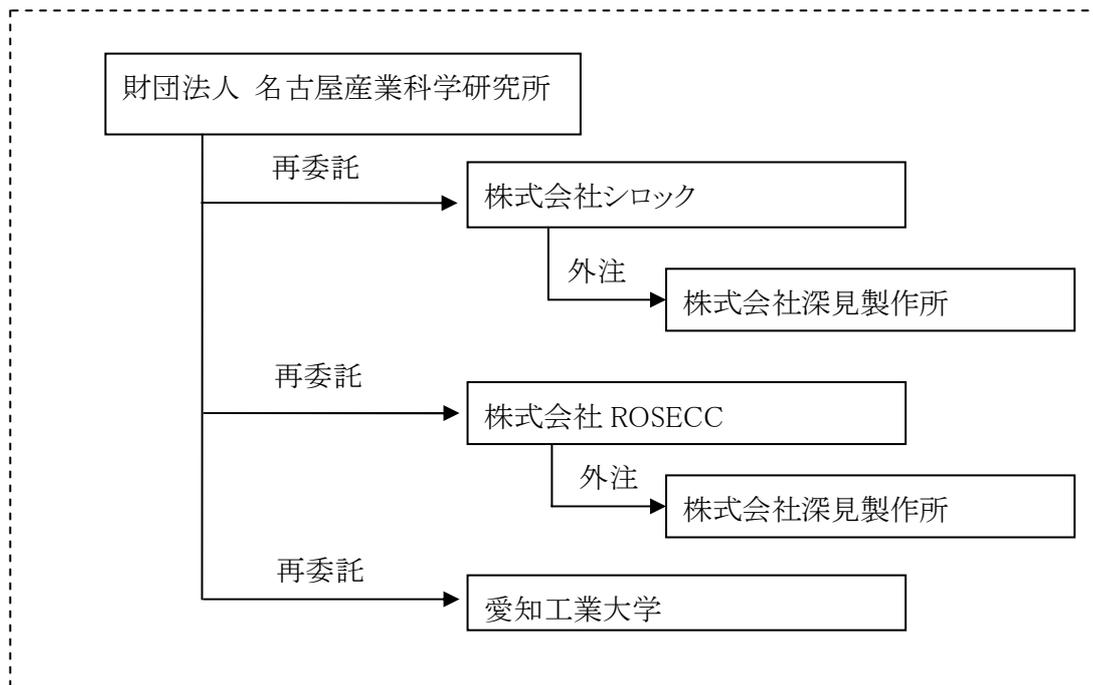
- ①切削速度の向上 (複合材切削: 1,000mm/秒 → 1,300mm/秒)
- ②低水压切削 (300MPa → 220MPa)
- ③オリフィス(*5)径の細小化 (0.203mm → 0.152mm = 8/1,000inch → 6/1,000inch)

通常、複合材は、圧力 350MPa から 280MPa, オリフィス径 6/1,000inch から 9/1,000inch, 送り速度 500mm/秒から 1000mm/秒程度の条件で切削するが、超音波加振による切削能力の向上効果により、以上の3つの技術的目標値の達成を目指す。

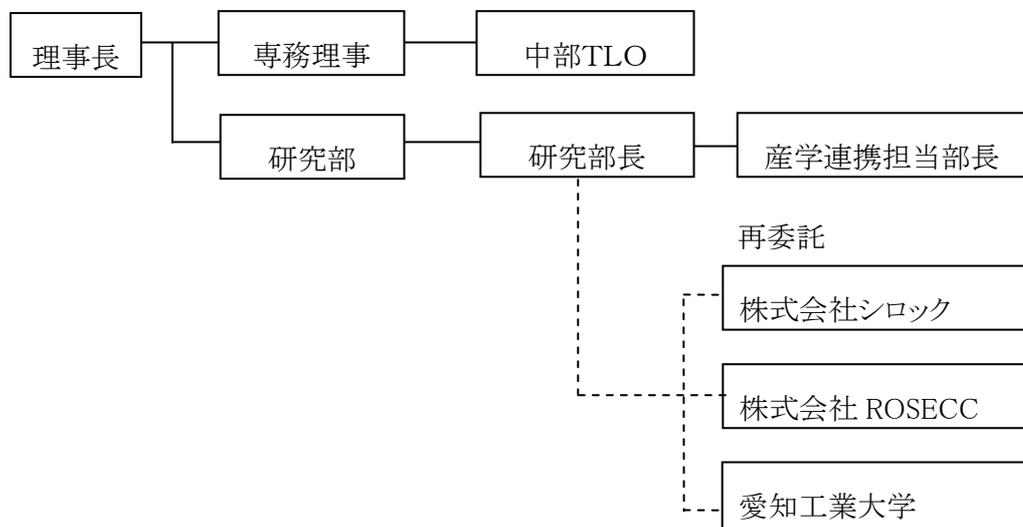
これにより、生産効率の向上、使用電力・水量の軽減、ランニングコストの削減、切削精度の向上を可能とし、二酸化炭素排出量も同時に低減し低炭素社会の実現に資する。

1-2 研究体制

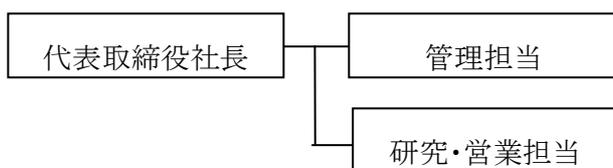
1-2-1 研究組織と管理体制



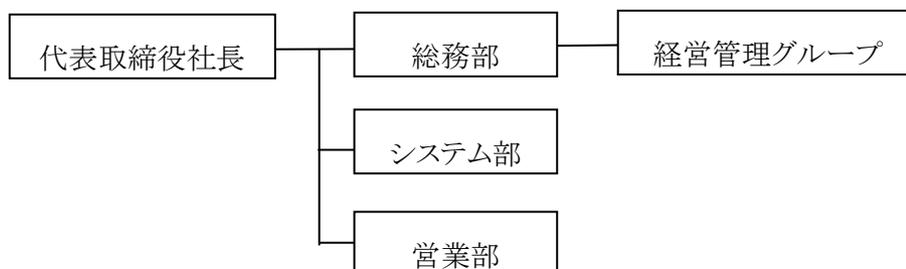
事業管理者: 財団法人 名古屋産業科学研究所



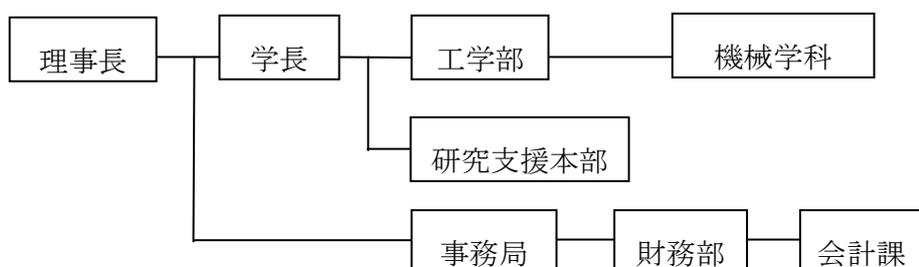
再委託先:株式会社シロック



再委託先:株式会社 ROSECC



再委託先:愛知工業大学



1-2-2 事業管理者及び研究者等氏名

【事業管理者】財団法人名古屋産業科学研究所

氏名	所属・役職	実施内容(*6)
江崎 忠男	研究部産学連携支援担当部長	【4】

【再委託先】

株式会社シロック

氏名	所属・役職	実施内容(*6)
白木 良彦	代表取締役社長	【1】【2】【3】
深谷 光信	リーダー	【1】【2】【3】
森岡 香多		【1】【2】【3】
原 千佳		【1】【2】【3】

株式会社 ROSECC

氏名	所属・役職	実施内容(*6)
堀 志磨生	代表取締役社長 PL	【1】【2】【3】
坂本 正樹	システム部 WJリーダー	【1】【2】【3】
横井 雅丈	システム部 設計担当	【1】【2】【3】
渡辺 昭博	システム部 リーダー	【2】【3】
鈴木 晴雄	システム部 リーダー	【1】【2】【3】
鳥塚 みちよ	システム部 アシスタント	【1】【2】【3】
小田 愛	システム部 アシスタント	【1】【2】【3】
山本 啓雅	システム部	【1】【2】【3】
木村 正太	システム部	【1】【2】【3】

愛知工業大学

氏名	所属・役職	実施内容(*6)
北川 一敬	工学部 機械学科 准教授 SL	【1】【2】

1-2-3 アドバイザー

トヨタ紡織株式会社	常務執行役員	原 保信
愛知工業大学 工学部 機械学科	教授	安田 仁彦
財団法人名古屋産業科学研究所	アドバイザー	服部 忠
財団法人名古屋産業科学研究所	アドバイザー	藤沢 寿郎

1-3 成果概要

ここでは、本事業における研究成果について、1-1-2で記した技術的目標値に対する成果と達成度に絞って記載する。

1) 切削速度の向上(ウレタン・ガラスウール・不織布切削: 1,000mm/秒→1,300mm/秒)

複合材の切削においては、WJノズルを超音波で加振させることにより、切削能力が向上し、切削速度を高めても問題なく切削できることがわかった。

具体的な実験の結果としては、245MPa、オリフィス径 8/1,000inch、送り速度 1000mm/秒の条件下において、加振無しの場合は切削できなかったところ、28kHz 及び 40kHz の分離タイプで加振して切削したところ、切削することができた。なお、28kHz 及び 40kHz の分離タイプで加振して切削した場合、同条件下では送り速度 1,400mm/秒の設定でも切削することができた。

このように、超音波による加振により切削能力が向上したことから、送り速度を上げた場合でも、加振しない場合と同様に切削できることを確認し、また、技術的目標値の送り速度 1,300mm/秒については達成、それを上回る 1,400mm/秒での切削も可能ということも判明した。

2) 低水圧切削(300MPa → 220MPa)

複合材においては、220MPa での切削は加振の有無に関わらず糸残が多い結果となり、技術的目標値を達成することはできなかったが、水圧は 280MPa まで低下させても、問題なく切削することができた。

本事業で開発した製品モデルでは、オリフィス径 6/1,000inch、送り速度 2000mm/秒のとき、40 kHz 分離タイプにおいて加振させた場合、300MPa に対し圧力を 280MPa まで低下させても切削できる結果が得られた。

3) オリフィス径の細小化(8/1,000inch → 6/1,000inch)

超音波振動を付加させることで切削能力が向上することは確認できたが、複合材の切削において、使用するオリフィス径を 6/1,000inch に細小化させて、8/1,000inch での場合と同等の切削能力を確認するには至らず、技術的目標値を達成することはできなかった。これは振動付加による切削能力の向上効果よりも、オリフィス径の細小化で噴射水量が減少したことによる切削能力の低下効果が上回ったのではないかと推測できる。

なお、技術的目標値は達成できなかったものの、次の研究成果が得られた。

a) 同一オリフィス径(6/1,000inch)での切削能力の比較

圧力 245MPa、オリフィス径 6/1,000inch の条件において、加振させない場合、切削できる最速の送り速度が 300mm/秒であったところ、超音波振動子(製品モデル)40kHz分離タイプで加振させて切削した場合、送り速度 600mm/秒まで速めることができた。振動付加により切削能力が向上したと推測できる。

b) 6/1,000inchと8/1,000inchとの切削能力の比較

圧力 245MPa の条件下で複合材を切削したとき、オリフィス 8/1,000inch で加振させない場

合の最速送り速度が 1,000mm/秒なのに対し、オリフィス 6/1,000inch を 40kHz 分離タイプの製品モデルで加振させた場合、600mm/秒であった。切削能力は同等とは行かないものの、6/1,000inch オリフィスを加振させることにより、切削能力を 8/1,000inch オリフィスの切削能力に近づけられることがわかった。

なお、本事業の研究の経過と結果については、詳細を第2章において記載する。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

財団法人名古屋産業科学研究所(研究部)

〒464-0819 愛知県名古屋市千種区四谷通1丁目13番地 ノア四谷ビル2F

TEL 052-781-1883 FAX 052-781-1884

担当:位田敏夫 inden@nisri.jp

第2章 本論(研究開発の成果) (*7)

2-1 高効率専用ノズルの設計と製作

2-1-1 数値流体力学を用いたノズル形状の決定

1) 計算条件の設定

計算条件を設定する為に、WJ内の流量からオリフィス速度とRe数を計算した。

WJ内の流量 1.1L/min

$$Q=1.1\text{L}/\text{min}=1.1\times 10^{-3}/60=1.1/6\times 10^{-4}\text{m}^3/\text{s}$$

WJ内の速度

$$v=Q/A=(1.1/6\times 10^{-4})/[\pi/4\times (3.2\times 10^{-3})^2]$$

$$=(2.2\times 10^{-4})/[3\pi\times (3.2\times 10^{-3})^2]=2.279\dots=2.28\text{ m/s}$$

レイノルズ数 Re

$$\text{Re}=\rho vd/\mu = [10^3\times 2.28\times 3.2\times 10^{-3}]/[17.72\times 10^{-6}]=4.12\times 10^5 : \text{乱流状態}$$

2) 計算モデル

1) から、流れ場は乱流(*8)状態、気相、液相、蒸気相を含んだ三相の混相流モデル⁽¹⁾を考慮しなければならない。表1は計算手法を示す。基礎方程式として、水のような非圧縮性流体では、非圧縮性ナビエストークス方程式⁽²⁾⁽³⁾ (*9)を用いる。

計算モデル	混相流(mixture model)モデル 液相、気相、蒸気相(キャビテーション相)の三相を使用
基礎方程式	振動付加無：2次元軸対称非圧縮性ナビエストークス方程式 振動付加有：2次元非圧縮性ナビエストークス方程式
乱流モデル	標準k-εモデル、標準壁関数
キャビテーションモデル	Schnerr-Sauer法 気泡核数密度 10^{13} 個/ m^3 、飽和蒸気圧3540Pa(at 300K)
計算スキーム	有限体積法(*10)、 速度-圧力連成 SIMPLE法、圧力補間 PRESTO 運動量、体積分率、乱流運動エネルギー、 乱流散逸率 1次精度風上差分
時間積分	1次精度陰解法、時間刻み 10^{-7} s
緩和係数	圧力、密度 0.5、運動量 0.2、 乱流運動エネルギー、乱流散逸率 0.4、乱流応力 0.6
振動付加条件	y軸のソース項にユーザ定義関数により加振条件を付加

表1 計算手法

キャビテーション(*11)を含む工学的問題を解析する際に^{(4)~(10)}、蒸気と液体の密度差(密度比は最大100,000倍の場合もある)が大きいために、単相非圧縮性流体に適応する緩和係数では計算が収束しにくい場合がある。収束性を向上する為に、運動量方程式、混合物の密度、蒸気の質量などの緩和係数を表1のように小さく設定した。

3) 計算格子

図1は計算領域、図2は代表的なオリフィス形状。図3は振動付加無の場合、オリフィス径 14/1,000inch のオリフィス部の計算格子を拡大したものを示す。

計算格子は計算結果の拡散と精度を落とさない為に構造格子を使用した。格子点数は179,578であり、中心部に軸対称モデルとした。表2は計算格子点と最小格子幅を示す。オリフィス径に応じて、格子点数と最小格子幅は変更している。キャビテーションモデルでは、格子点数を増やしても物理現象の把握に改善が見られないことが知られており、17万点程度の格子点数で十分である。

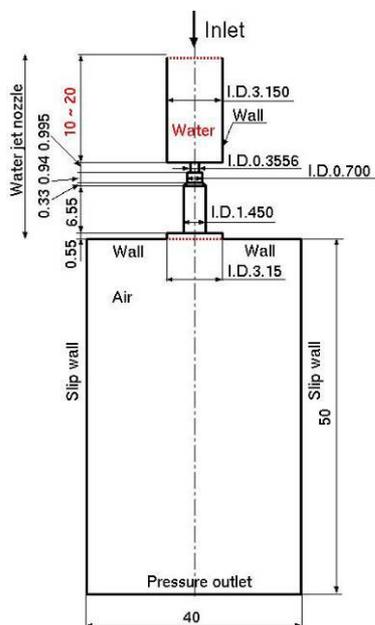


図1 計算領域

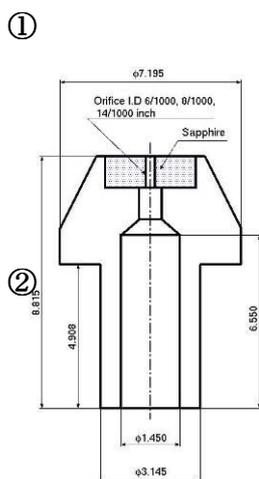


図2 オリフィス形状

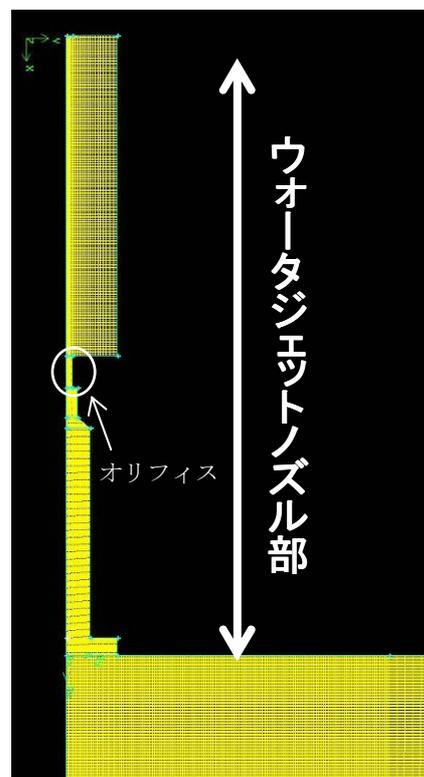


図3 オリフィス部の計算格子

オリフィス径	6/1,000	8/1,000	14/1,000	
計算格子点数	175,617	147,962	179,578	
最小格子幅	X, mm	0.0254	0.0254	0.0254
	Y, mm	0.01524	0.01693	0.01778

表2 格子点数と最小格子幅(振動付加振無の場合)

4) 初期条件と境界条件

超高压の水が圧力 330, 290, 237MPa で流入する条件を与え、境界条件は、ノズル付近などは壁の条件を入れた。表 3 及び表 4 は初期条件と境界条件を示す。入口境界では、圧力流入、出口境界では、圧力流出を定義した。ノズルなどの壁は壁面条件とし、表面で滑り無しとした。初期条件では、図 1 の①部、②部に分けて計算の状態量を入れた。

初期条件							
①部	体積分率	液相	1	②部	体積分率	液相	0
		気相	0			気相	1
		蒸気相	0			蒸気相	0
	圧力, MPa		330,290,237		圧力, MPa		0.10132
	速度, m/s		—		速度, m/s		0

表3 初期条件

流入条件				流出条件			
①部	体積分率	液相	1	②部	体積分率	液相	—
		気相	0			気相	1
		蒸気相	0			蒸気相	—
	圧力, MPa		330,290,237		圧力, MPa		0.10132
	速度, m/s		—		速度, m/s		—

表4 境界条件

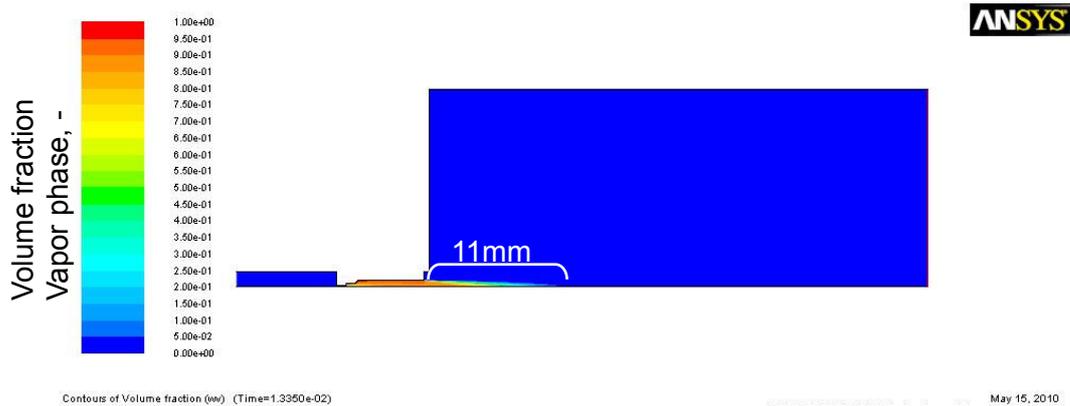
5) W J ノズルの流体解析結果

本解析では、気相、液相、蒸気相を含んだ三相の混相流モデルとして取り扱っている。

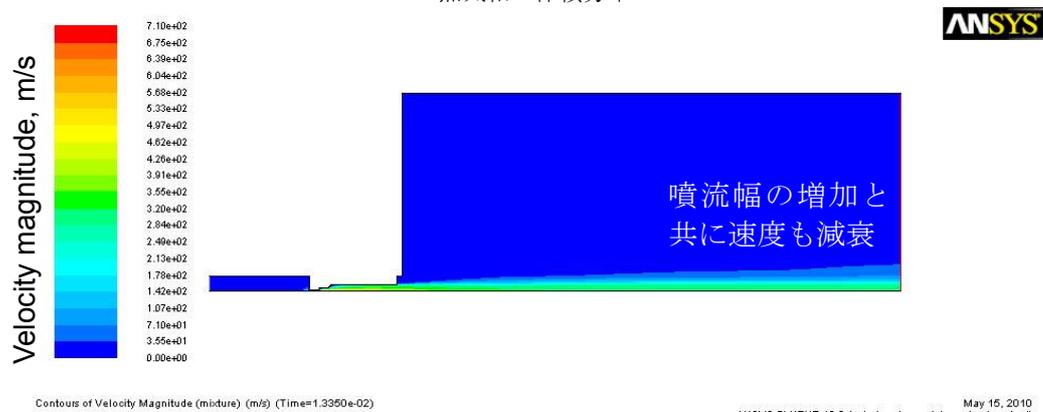
図4は、ポンプ吐出圧力**330MPa**、オリフィス径**14/1,000inch**のW J 流れの数値計算結果を示す。各図は、蒸気相、液相、混合相の速度分布を示す。高圧の水が流入しオリフィスまでは液相のみが存在している。

図 4 から、高圧水がオリフィス部分に達し、オリフィスを通過すると、液相が減り蒸気相の割合が増加し、キャビテーションが発生している。高圧水がノズルから噴出されると蒸気相は減少し、液相の割合が増え、出口から **11mm** で蒸気相は消滅する。オリフィス内では液体を高速で流す場合あるいは物体を液体中で高速に運動させる為にキャビテーションが発生する。またノズルから出た後、圧力が回復する(高くなる)とキャビテーションは消滅(崩壊)する。キャビテーションモデルでは、小さい液滴の評価は難しい。小さい液滴を評価するための手法は、流体体積法(**Volume of Fluid Method**, 以下 **VOF 法**)が有効である。しかし、**FLUENT** では、**VOF 法**とキャビテーションモデルの複合モデルの評価ができず、他数値流体ソフトを用いる必要がある。図 4 の速度分布から、**WJ** は大気圧内へ噴出され、ノズル近傍の噴流は中心に速度が減衰しないポテンシャルコア領域、噴流と周囲流体が混合する混合領域、乱流噴流の崩壊領域が確認できる。噴流は周囲の流体との間の大きな速度差と流体の粘性の作用によって、周囲の流体を巻き込み噴流幅を広げ、噴流速度が減少しながら下流方向へ流れていく様子がシミュレートされている。キャビテーションが発生している為に、非常に性能の良いオリフィスであり、キャビテーションの存

在により切削力が上昇する。



蒸気相の体積分率



速度分布

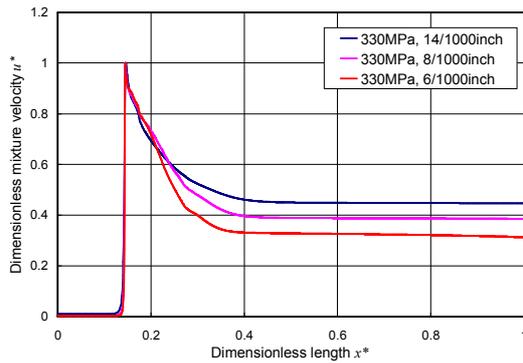
図4 W J 流れの数値計算結果, 吐出圧力 330MPa, ノズル径14/1,000inch

キャビテーション数はキャビテーションの起こりやすさを示す無次元数である。

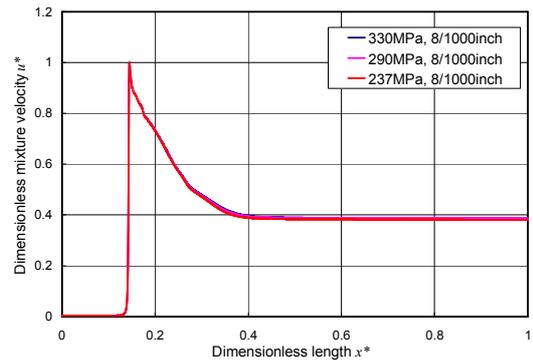
	330MPa	290MPa	237MPa
キャビテーション数 σ	1.000296	1.000338	1.000413

表 5 キャビテーション数

表 5 はポンプ吐出圧力とキャビテーション数の関係を示す。一般に、流体機械では $\sigma < 2$ においてキャビテーションが発生する。また、キャビテーション数が小さくなるに従ってキャビテーションが発生しやすくなる事が知られている。本条件において、WJ 流れでは $\sigma \approx 1$ となり、キャビテーションが発生すると考えられる。



(a) 無次元速度分布，オリフィス径の違い



(b) 無次元速度分布，ポンプ吐出圧力の違い

図5 中心軸上の混合相の速度分布

図5は中心軸上の速度分布を示す。図5(a)は無次元速度におけるオリフィス径の違い，図5(b)は無次元速度におけるポンプ吐出圧力の違いを示す。図5(a)と図5(b)はオリフィス部の最大速度で無次元化した $u^*(=u/u_{max})$ を縦軸に示し，横軸に計算領域の軸方向の距離で無次元化した位置 $x^*(=x/L)$ を示す。図5(a)から，オリフィス部の径によって，ノズル部から出た速度は最大速度の0.3から0.5倍となる。図5(b)から，同じ径のオリフィス部では，流入圧力による速度分布の差異が殆ど見られず，無次元速度にする事でオリフィスの性能が十分予測する事が可能である。

2-1-2 ノズル形状の実験的検証

切削効率，切削加工面の向上などを目的として，標準ノズル形状から新たにノズル内を通る高圧水に対し整流性を持たせる為に任意の内径形状の試作ノズルを製作し，流動試験を実施した。これは，オリフィスより噴射する高圧水の整流を確保する目的がある。

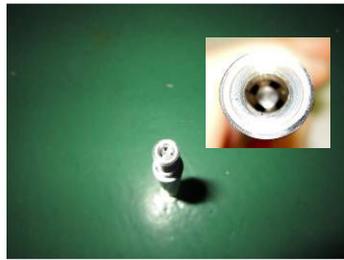
1) WJノズルの形状

標準ノズルチューブは内径0.1inchで，材質はキャビテーションの影響に耐えうるSUS316(*12)である。6/1,000~14/1,000inchのオリフィスを設定することで切削幅や切削速度などが変更できる。

図6は本研究課題で製作した試作ノズルを示す。図6(a)は標準ノズルの流路に螺旋加工を施した形状の中子を入れたスパイラルノズル，図6(b)は標準ノズルの流路に縦溝加工を施した形状の中子を入れたスプラインノズル，図6(c)は標準ノズルの流路にテーパ（絞り）加工を施した形状の中子を入れたテーパノズルである。試作ノズルチューブの材質はSUS316を選定し，各形状についてピュアWJ用9/16inch，アブレッシブWJ用3/8inchで設計した。



(a) スパイラルノズル



(b) スプラインノズル



(c) テーパーノズル

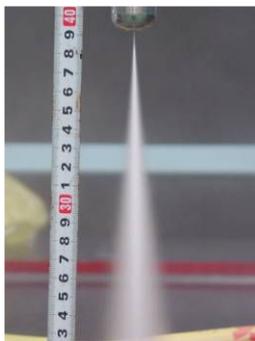
図6 試作ノズル

2) W J ノズルの性能比較試験

上記のノズルの性能を調べる為に、W J の噴流・ワーク切削結果の各比較、ノズルの耐久試験を通して検証した。各試験方法と結果は以下に記す。

a) W J 噴流の比較

ア) 目視によるW J 噴流の比較



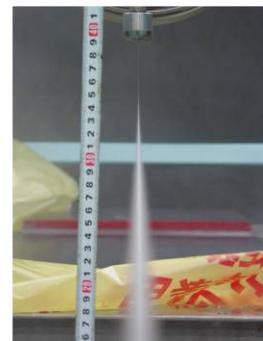
(a) スパイラルノズル



(b) スプラインノズル



(c) テーパーノズル

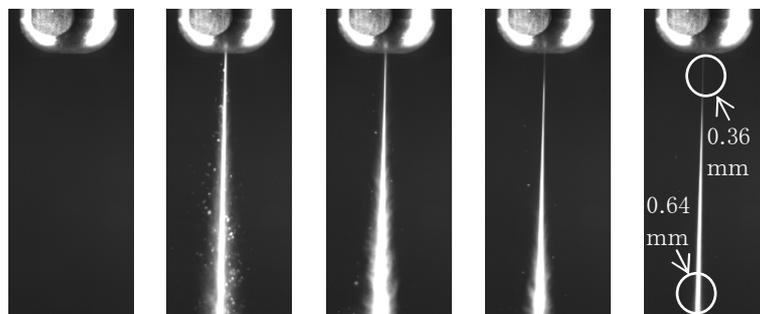


(d) 標準ノズル

図7 各種ノズルチューブにおける噴流状態 (圧力 350MPa オリフィス 6/1,000inch)

図7は圧力 350MPa, オリフィス 6/1,000inch の条件下での各種ノズルチューブにおける噴流状態を示す。図7(a)はスパイラルノズル, 図7(b)はスプラインノズル, 図7(c)はテーパノズル, 図7(d)は標準ノズルである。標準ノズルチューブとの噴流試験比較の結果、製作したノズルチューブは、オリフィス近傍で噴流の乱れが発生し、切削効果に悪影響を及ぼすことが分かった。ノズルチューブ内で乱流を起こしていると推測できる。

イ) ハイスピードカメラによるWJ 噴流の可視化検証



0

100

200

300

400

(a) 標準ノズル

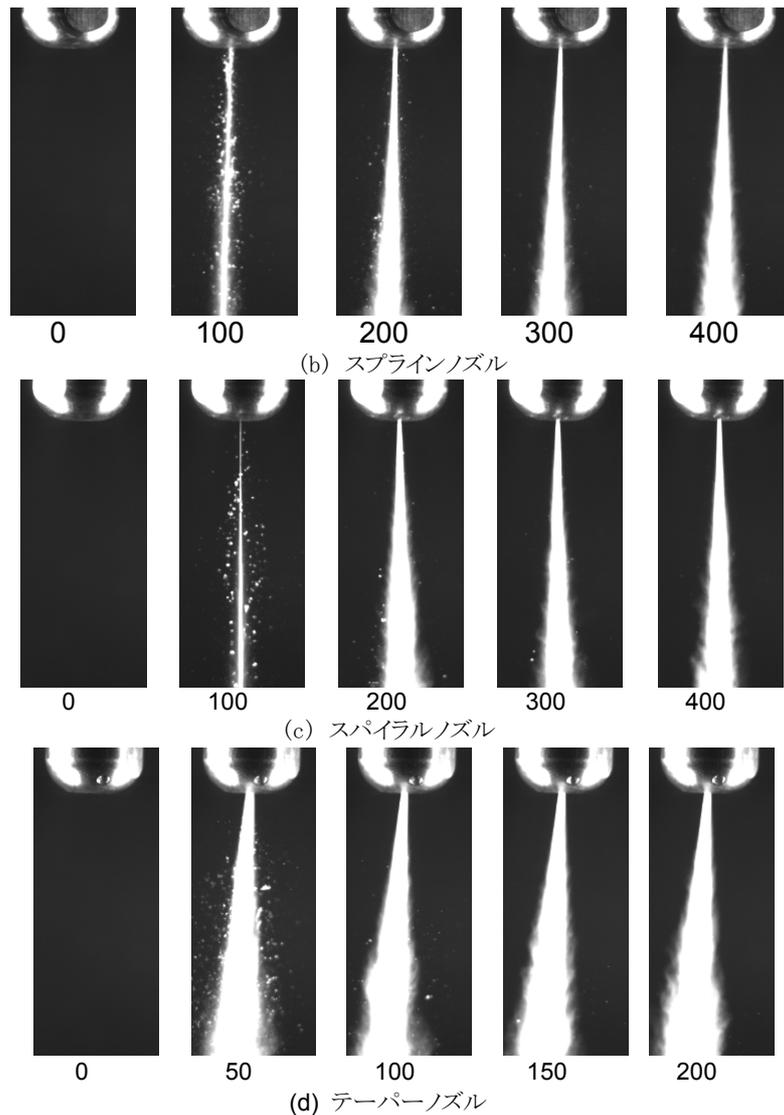


図8 PWJの流動様式の可視化, オリフィス6/1,000inch, $\Delta t=100\mu s$

図8はピュアWJ（以下、PWJ）の流れ場の可視化結果を示す。図8(a)は標準ノズル，図8(b)はスプライン，図8(c)はスパイラル，図8(d)はテーパの結果である。撮影条件は，解像度：512 pixel×192pixel，撮影速度 40,000fps，シャッタ速度 1/40,000s で撮影を行った。PWJ撮影時には，噴流は静止した大気圧内へ噴出され，PWJの送り速度は0である。

PWJノズルは標準ノズルの性能が一番良くなる事が確認できた。

b) ワーク切削結果の比較

製作したノズルの切削効果を確認する為、高度化目標に掲げる複合材（複合材）で切削確認を行う。

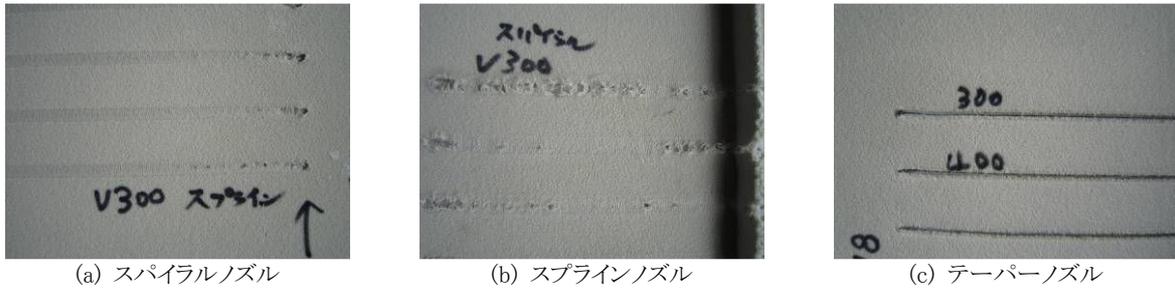


図9 複合材切削テスト状況(圧力 315MPa オリフィス 8/1,000inch スタンドオフ 15mm)

図9から、複合材の切削では、スプライン、スパイラルノズルチューブは全く切削が出来なかった。またテーパノズルでは、切削可能であったものの切削しろが太い。

c) ノズルの耐久試験

ア) 耐熱性・腐食性・耐圧性試験

耐熱試験はハンダこてにより 70℃まで加熱後冷却を行った。耐腐食性については 2/15 より水没させて経過を観察した。両試験共に外観で確認できる変色などはなかった。

イ) ノズルの歪み計測

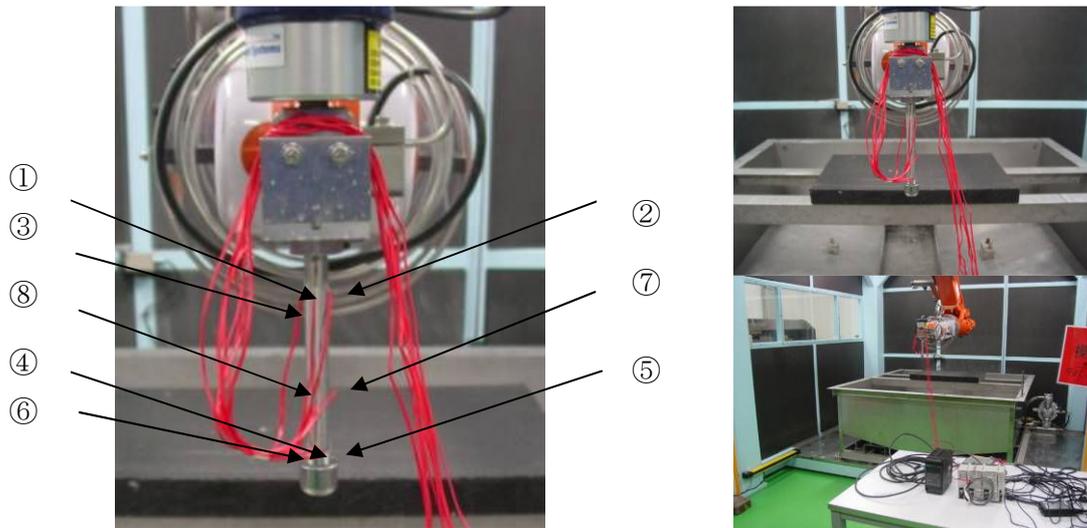
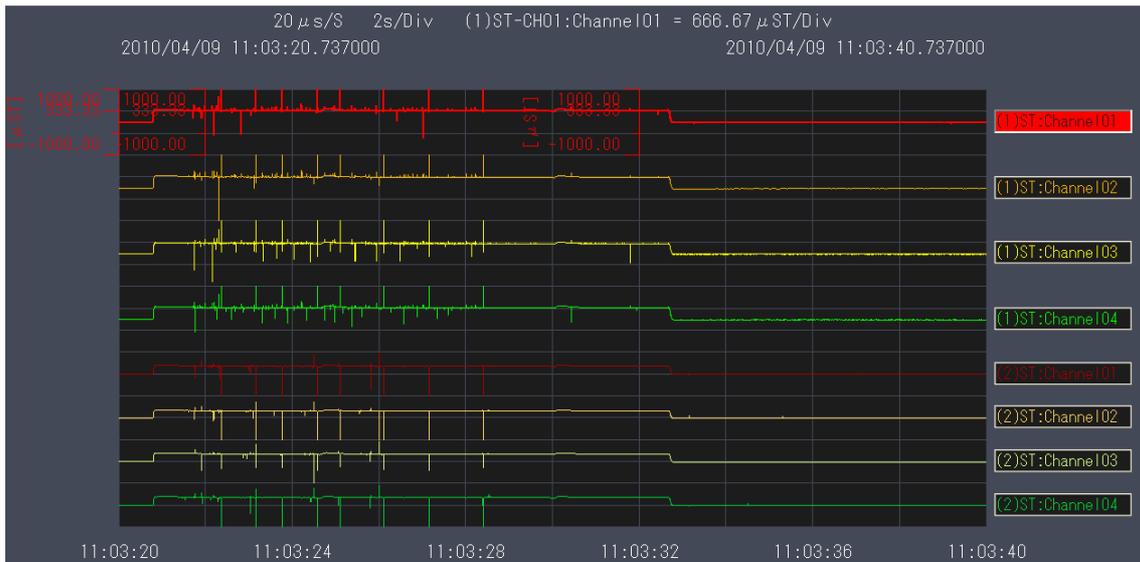
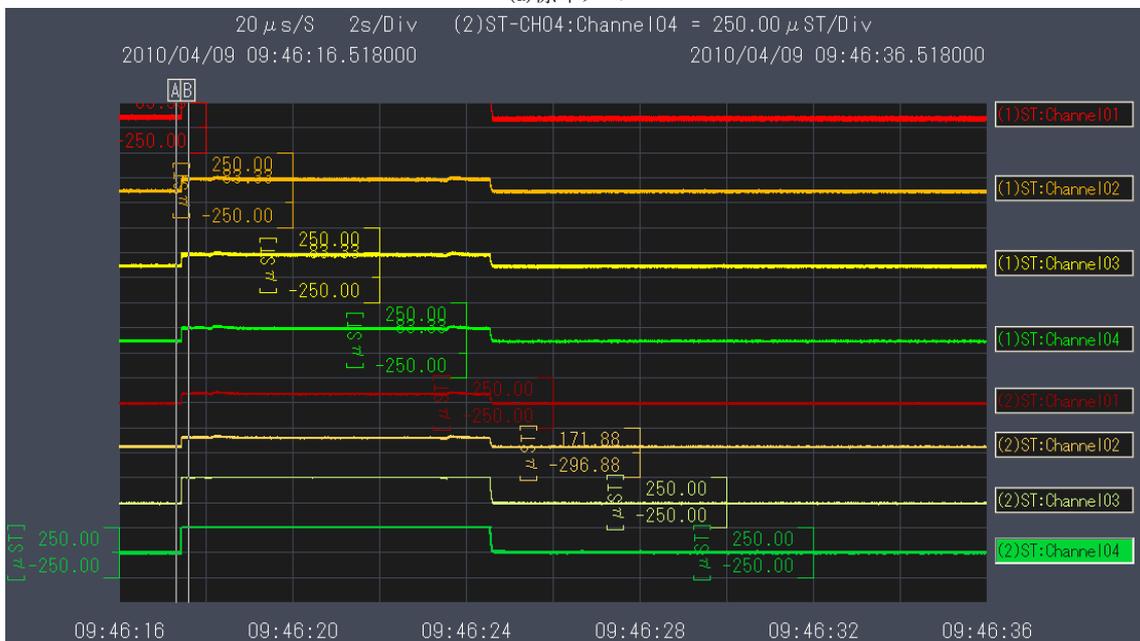


図10 歪み計測

図10は歪み計測器を使用し標準ノズルチューブと試作ノズルチューブ(スプラインノズル)の歪み計測を行ったときの写真を示す。図中の①から⑧は歪みの計測点である。歪み計測には 9/16inch ノズルチューブ、8/1,000inch オリフィスを使用した。歪み計測時のW Jの運転条件は標準ノズルチューブと試作ノズルチューブはすべてポンプ吐出圧力 350MPa とした。



(a)標準ノズル



(b) 試作ノズル(スプライン)

図 11 各種ノズルでの歪み計測結果

図 11 は各種ノズルでの歪み計測結果を示す。(a)は標準ノズル、(b)はスプラインノズルの計測結果である。高圧水噴射時(350MPa)、最大で400 μ m程度の歪みが発生していることが分かる。また歪みの状況から弾性変形を起こしていることも分かった。純正ノズルチューブも同じ様歪みの状態であった。

ウ) ノズル内径の壊食検査

ノズルの内径が超高压水によって破損していないか、壊食確認検査を岐阜県機械材料研究所へ依頼し検査を行った。サンプルAスプライン、サンプルBスパイラル、サンプルCテーパーとしノズルチューブの曲がりと外径計測では、ともにノズル先端付近で0.05m程度膨らみが有りそれに伴いサンプルBでは最大で0.79mmの曲がり計測した。

またマクロ試験ではサンプルA、サンプルBの内径形状に壊食が発生していないかどうか確認を行った。2本に限定したのは、内径部分に加工を施したピン材を挿入していたこともあり、条件的にはキャビテーションを起こしやすいからである。撮影の結果壊食痕は見られなかった。

3)WJノズルの検証結果

今回設計試作したノズルチューブはキャビテーションを起こしており、材質の変更を行ってもチューブやオリフィスの消耗を早める結果となるまた、複合材切削の結果から、ノズルの内径形状を変更することで切削効果が低下したため、今後は標準ノズルチューブで実験を実施する事とする。なお、歪み計測、耐熱、耐圧試験等を行った結果、9/16inch ノズルチューブの材質は SUS316 で問題ないと推測できる。

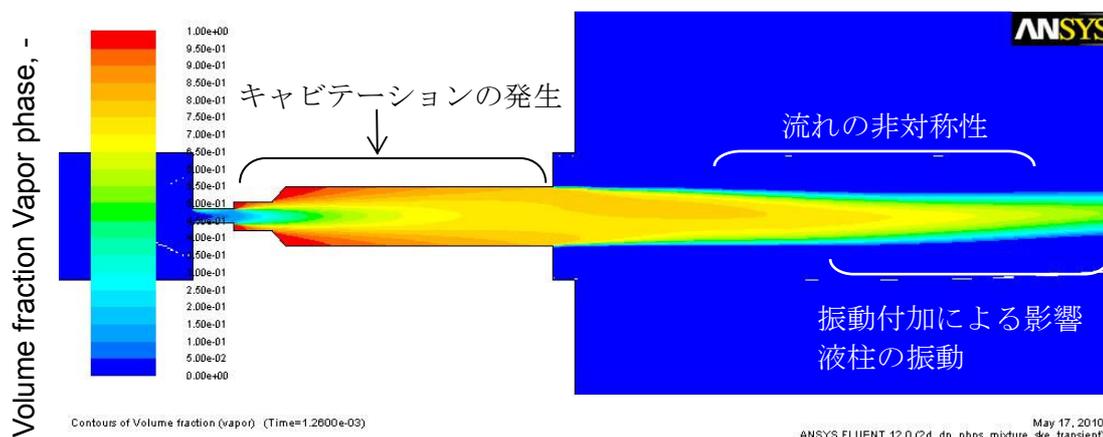
2-2 WJ専用超音波振動子の開発

2-2-1 超音波振動子の開発と既存ノズルへの適応

1) 超音波振動を付加したWJ特性の解析

図12は図21bの28kHzの計算結果をオリフィス部分からノズル出口部までを拡大した結果を示す。図12aは蒸気相の体積分率，図12bは混合相の速度，図12cは乱流エネルギー分布(k)を示す。

図12aから図12cにおいて、振動付加によって、体積分率、速度、乱流エネルギーに非対称性が発生している。図12aより、蒸気相の体積分率は、蒸気相の発生によってオリフィス部でキャビテーションが発生する。オリフィスからノズルへ出たのち流体中の蒸気相が更に増加し、キャビテーション領域が広がって行く。図12bより、オリフィス部の最大流速は760m/sとなり、オリフィスからノズルへ出たのち、流れが断面の急拡大によって、A部で剥離を起こし、B部で剥離渦が発生している。



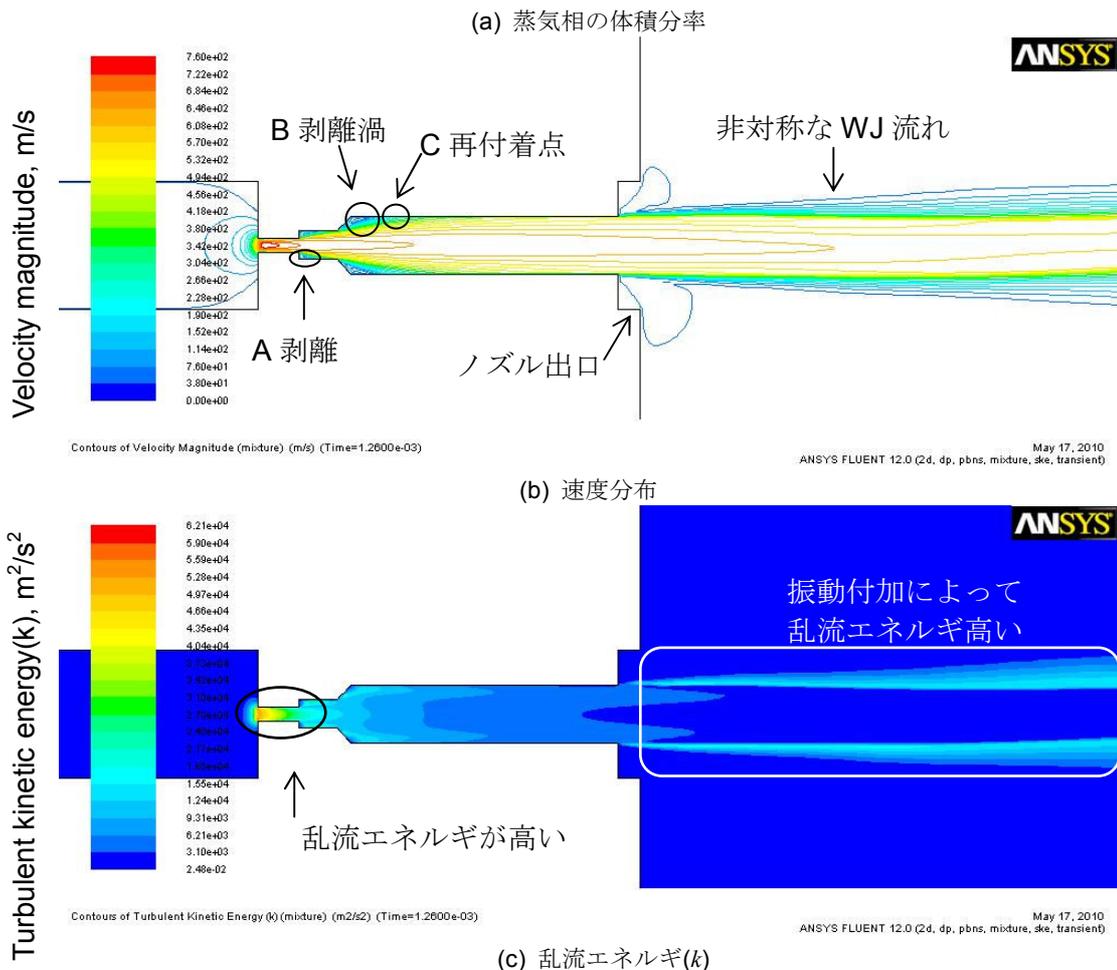


図 12 WJ 流れの数値計算結果, 吐出圧力 330MPa

その後、圧力を回復しながら C の再付着点に達し、ノズル壁面まで流れが発達する。ノズル出口から出た噴流はWJ流れとなる。但し、振動が付加されている為に、噴流幅の拡大が大きくなっている。図 12c より、オリフィス部入口で乱流エネルギーが高い事から、強い衝撃力が加わり、入口が一番良く磨耗すると考えられる。乱流エネルギーの分布はオリフィス管内で高く、次第に管壁へ磨耗が増えていくと考えられる。また、乱流エネルギーはオリフィス管内で入口部よりも減少している。振動を付加する事で、ノズル出口部から噴出した流れ場の乱流エネルギーが増加し、切削力が向上すると考えられる。

従って、振動付加した場合、オリフィス部では、入口が一番良く磨耗し、次に管壁へ磨耗が増えていく事が考えられる。振動を付加する事で、乱流エネルギーが増大し、切削力が向上する事がわかった。

2) 原理モデル製作試験

a) 原理モデルの目的

WJの効率を上げるために、WJに振動を加える為の振動子を開発するが、ノズルへの取り付け、振動伝達の確認、超音波振動による切削状況の確認をするため、第一段階として原理モデルを製作

した。原理モデルは横型振動と縦型振動の2種類を製作した。原理モデルは評価用であり、原理モデルでの検証を踏まえて製品モデルを製作する。

b) 原理モデルの仕様

ア) 横型 ノズルを横に振動をさせる。工具ホーンに水を通さない方式でノズルに取り付けるタイプ。

40kHz握りタイプ / 28kHz分離タイプ

イ) 縦型 ノズル縦に振動をさせる。工具ホーンに直接高圧水を通す方式。

28kHzタイプ / 19kHzタイプ

c) テスト結果

ア) 横型 40kHz握りタイプ / 28kHz分離タイプ

振動を加えることによる効果は認められた。

イ) 縦型

高圧水を導水試験の途中で 19kHz 工具ホーンは破損し、28kHz 工具ホーンは水漏れが発生したので、試験を中断した。(テスト時の圧力 140MPa)

d) 原理モデル縦型故障状況の報告

ア) 高圧水接続部分にクラックが発生した状況



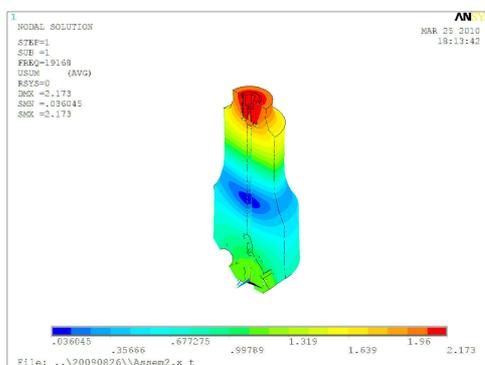
a) 28kHz 工具ホーン



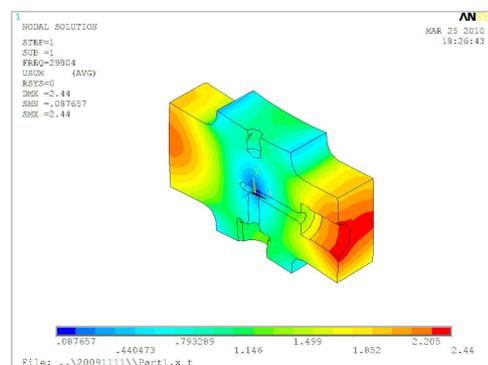
b) 19kHz 工具ホーン

図 13 高圧水接続部分にクラックが発生した状況

イ) 原理モデル縦型解析状況



a) 19kHz 工具ホーン



b) 28kHz 工具ホーン

図 14 原理モデル(縦型)解析結果

ウ)破損原因の調査分析及び結果

振動を効率よく伝える為の試験材料としてジュラルミンを選定したが、試験材料が持つ材料強度が高圧水による圧力に耐えられなかったと推測できる。図 14 の解析状況から、赤色部分には振動が十分伝わっていることが分かる。言い換えれば、構造上振動の伝達が良すぎて破損部分に負荷がかかり過ぎたと推測できる。この通り、縦型振動子は構造的に難しいと判断できた。

材質の違いによる振幅伝達の関係は変わらず、工具ホーンの形状により振幅数を増減できる。例えば最大振幅 15 μ m の振動子を使用しても工具ホーンの形状で振幅数を変えることが出来ることも分かった。適正振幅が解明できれば、高圧配管等の接続部に負荷のかからない振幅数の検討も出来る。

エ)今後の対策について

今回の研究では横型振動子での成果を出すことに全力をあげることにした。なお、補完研究ではメーカーとも協議し、愛知工業大学の指導も得ながら今回のテスト結果や破損の原因分析結果を踏まえ、構造等を再検討し、研究開発を継続する。縦型が実現出来れば商品化におけるデザイン性がよくなり、縦振動による単体の解析状況からも、切削効果も大きいと期待される。

3)超音波振動子(原理モデル横型)による加振の振幅計測

ア)振幅計測の条件

原理モデルでの超音波振動を付加させたノズルについて、振幅計測試験を実施した。振幅計測は、工場内での使用条件とは異なるが、基礎現象を知る為に、28kHz分離、40kHz握りの原理モデル各 2 タイプについて振幅を計測した。いずれも、ロボットに取り付けた状態のノズルに振動子を取り付けて計測したが、40kHz握りタイプについては、ロボットのサーボモーターに由来すると考えられる振動がノズル振動に影響を及ぼしている可能性が確認されたため、40kHz握りタイプのみ、ノズルをロボットから外しロボットの固有振動の影響がない状態での振幅も計測した。

イ) 振幅計測の結果

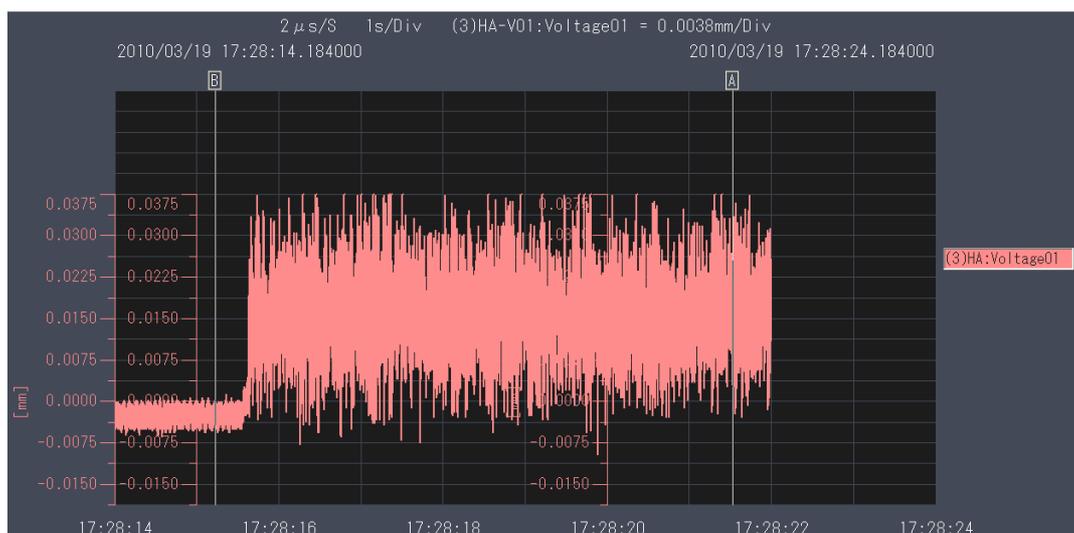


図 15 振幅計測実験結果(28kHz分離タイプ)

図 15 は 28kHz分離タイプによる振幅計測実験結果を示す。超音波で加振することにより $50 \mu\text{m}$ 程度の振動を確保する事が確認できた。

40kHz握りタイプの超音波振動子については、ロボットのサーボモーターON状態での振幅(最大 $15 \mu\text{m}$ 程度)から加振させたとこ、振幅が $5 \mu\text{m}$ 程度まで減少した。これは、ロボットのサーボモーターに由来する振動と共振したものと推測される。この結果を受けてロボットに取り付けない状態で振幅を計測したところ、加振させることにより約 $8 \mu\text{m}$ 程度の振幅が確認できた。

ウ) 計測結果からの考察

計測結果より、振幅の確保という点では、40kHzの振動子より 28kHzの振動子を使用した方がよいことが考察される。

4) モデルデザイン

今回得られた研究成果を基にWJの新しいモデルデザインを検討した。製作した原理モデルを参考に、防水対策、振動子本体の冷却方法を検討した上で外形が著しく逸脱しない範囲で成立しかつ商品化を見据えたデザインである。

WJのモデルデザインでの重要な検討課題は以下の通りである。

- ①振動子本体、ケーブルの防水対策
- ②冷却配管の取り付け位置
- ③ロボットノズルブラケットへの固定方法
- ④デザイン
- ⑤工具ホーンの材質
- ⑥分離タイプでのチューブを叩く部分の構造

上記項目を検討しメーカーへ提案することとした。また工具ホーンが振幅を伝えるための大きな役目をしている為、なるべくコンパクトに設計した。

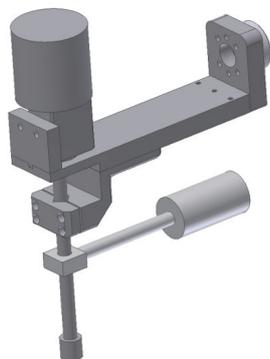


図 16 新しい WJ システムの提案



図 17 WJ システムでの振動子干渉確認実験

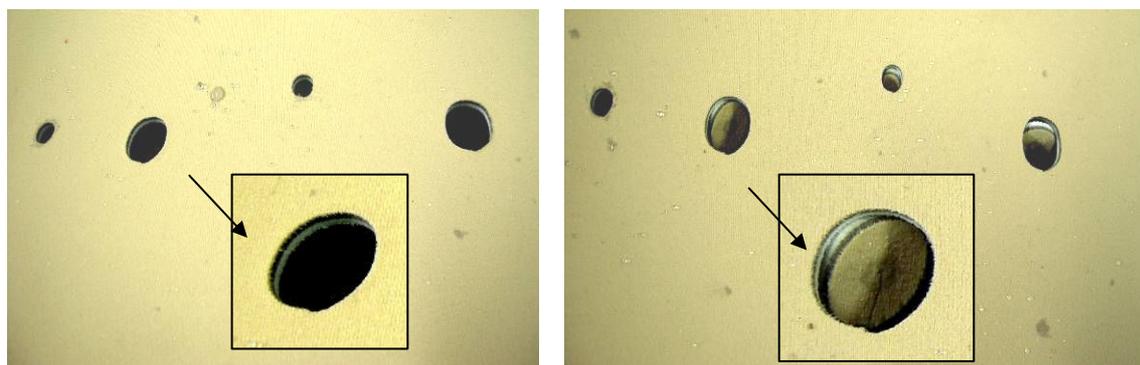
図 16 は新しい超音波振動を付加した WJ システムを示す。図 17 は ROSECC において WJ システムに超音波振動装置を装備したと仮定し干渉確認の様様を示す。WJ システムと超音波振動装置、また超音波振動装置の取り付け位置による治具やワークとの干渉がないか、実地検証とシミュレーションによる確認を行った。

2-2-2 繰返し衝撃力発生による切削性と貫通力の向上

超音波振動子の原理モデル(28kHz分離タイプ、40kHz握りタイプ)により WJ ノズルを加振した状態でワークを切削し、加振により切削能力等にどのような変化があるかを検証する。切削したワークは、複合材、アルミニウム板、SS400 板、電子基板の 4 種類。

1) 複合材

a) 同一条件での加振有無の影響



(a) 超音波振動付加(40kHz 握りタイプ)

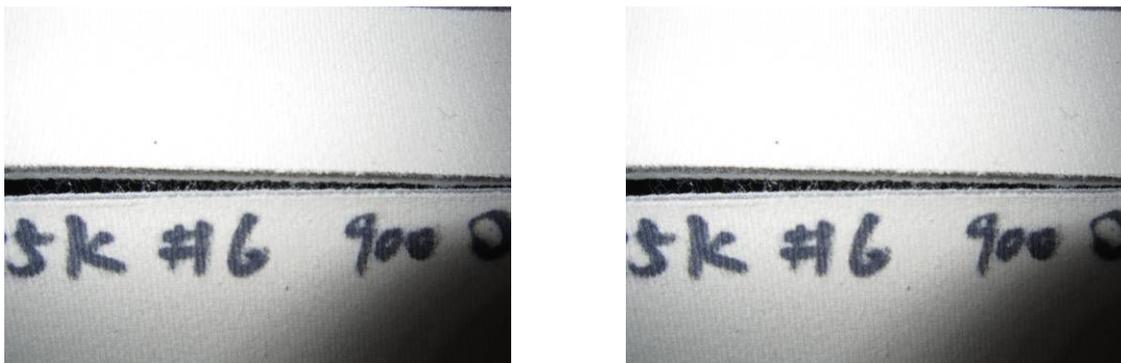
(b) 超音波振動付加無

図 18 切削の超音波付加の影響

(ポンプ吐出圧力 280MPa, オリフィス 6/1,000inch, 送り速度 200mm/秒)

図 18 は切削時の超音波付加の影響を示す。図 18(a)より、超音波振動付加することで複合材を完全に切削できた。図 18(b)より、加振しない場合、糸残りにより切削部分が残っている。

b) 超音波振動付加と送り速度の影響



(a) 超音波振動付加, 送り速度 900mm/秒 (b) 超音波振動付加無, 送り速度 700mm/秒

図 19 28kHz 分離タイプにおける振動付加と送り速度の影響 (圧力 245MPa オリフィス 6/1,000inch)

図 19 は原理モデルにおける切削加工に及ぼす振動付加と切削送り速度の影響を示す。送り速度を 700mm/秒から 900mm/秒に上げても、振動付加により同等の切削結果が得られた。

2) アルミニウム板貫通試験

AWJにて、アルミニウム板(厚み 40mm)貫通試験を実施した。振動子は 40kHz握りタイプを使用し、加振の有無での切削時間を比較した。条件は圧力 385MPa, オリフィス径 14/1000inch, ガーネット量 190g/分, スタンドオフ 5mm の条件である。

貫通時間	ノズル条件(振動パターン/取付位置)			
	振動なし	振動あり(40kHz 握りタイプ・連続)		
		下部	上部	最下部
平均	53 秒	47 秒	50 秒	44 秒

表 6 アルミニウム板(厚み 40mm)貫通試験結果

表 6 はアルミ貫通試験の結果を示す。加振しない場合と比較して、最下部に振動子を取り付けて加振させた場合平均 9 秒早く貫通した。また、振動子の取付位置を変更することで貫通時間が変わった。

3) SS400 カット試験

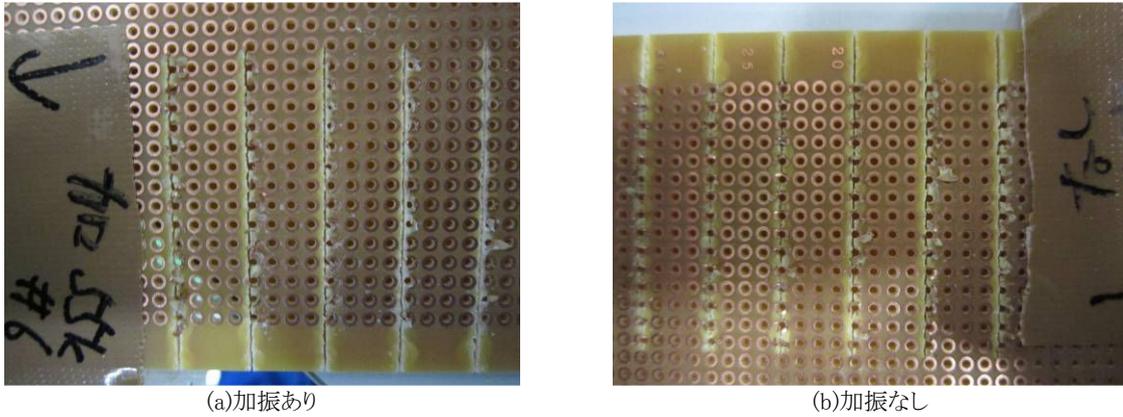


2.5mm/秒 加振なし	2mm/秒 加振なし
2.5mm/秒 加振あり	2mm/秒 加振あり

図 20 加振有無及び送り速度による切削面比較
(条件: 圧力 315MPa オリフィス 14/1,000inch ガーネット 190g/分)

図 20 は40kHz横型握りタイプでの加振有無及び送り速度による切削面比較を示す。SS400 厚み 16mm の切削では、振動の有無による切削効果の差は見られなかった。また加振状態では切削面が加振なしの状態と比べ多少粗くなった。これは、ノズルの振動が影響していると推測できる。

4) 電子基板切削テスト

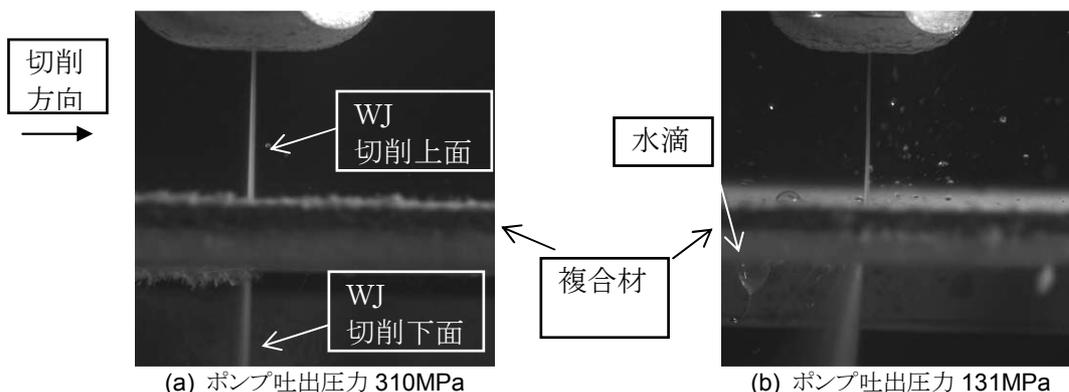


(a)加振あり (b)加振なし
 図 21 28kHz 分離タイプ原理モデルにおける加振有無の基板切削
 (条件:385MPa オリフィス径 6/1,000inch 切削速度 65~85mm/秒)

図 21 はPWJでの 28kHz分離タイプ原理モデルによる振動付加の有無による基板切削を示す。樹脂部分の切削は可能であったものの銅箔部分の剥離が発生した。同様の試験で切削効率を上げるためオリフィス径を 8/1,000inch に上げ行ったが、結果は同様であった。加振の有無にかかわらず樹脂部分の切削は完全に切削出来たが、銅箔はほとんどが剥離してしまった。PWJではレアメタルに対しての切削効果が低く、加振を付加したとしても切削できないことが分かった。

PWJでの切削結果を受けて、28kHz分離タイプ原理モデルを用いてAWJで基板切削を実施した。(条件はポンプ吐出圧力 280MPa, オリフィス径 10/1,000inch, ガーネット 190g/分, 切削速度 100mm/秒)AWJでは、銅箔の剥離もなく切削を行うことができた。本試験はAWJでの基板切削可否の確認のため十分な条件出しはできていないが、オリフィス径の小径化、水圧を下げるなどさらに良い切削条件を見出すことは十分に可能であると推測できる。

2-2-3 ハイスピードカメラを用いた可視化 (流れと切削現象)



(a) ポンプ吐出圧力 310MPa (b) ポンプ吐出圧力 131MPa
 図 22 28kHz の超音波振動を付加した場合のPWJの切削状態, オリフィス 6/1,000inch ノズル形状 標準

図 22 は 28kHz の超音波振動を付加した場合、標準ノズル使用時の WJ の流れ場の可視化結果を示す。図 22(a) は、ポンプ吐出圧力 310MPa、図 22(b) は 131MPa である。撮影条件は、オリフィス径 6/1,000inch、解像度 1024 pixel×1024pixel、撮影速度 5,400fps、シャッタ速度 1/5,400 秒、使用レンズ 105mm、接写リング 12.5mm を用いて撮影を行った。可視化画像は切削状態を横から可視化し、写真上部にPWJと WJ 流れ、中間には複合材、下部には切削後の WJ 流れ、切削方向は左から右(→)である。

図 22(a) の場合、ポンプ吐出圧力が低下しても、ノズルから出たジェットは複合材に貫入し、複合材を切断し、切削下面へ貫出する。ノズルは左から右へ送られて行く為、複合材から出た流れは拡散している。図 22(b) の場合、低いポンプ吐出圧力では、ノズルから出たジェットは複合材に貫入している。しかし、切削上面では圧力が低い為に複合材から反射飛散した水滴が多く、切削下面においても大きな水滴が確認できた。

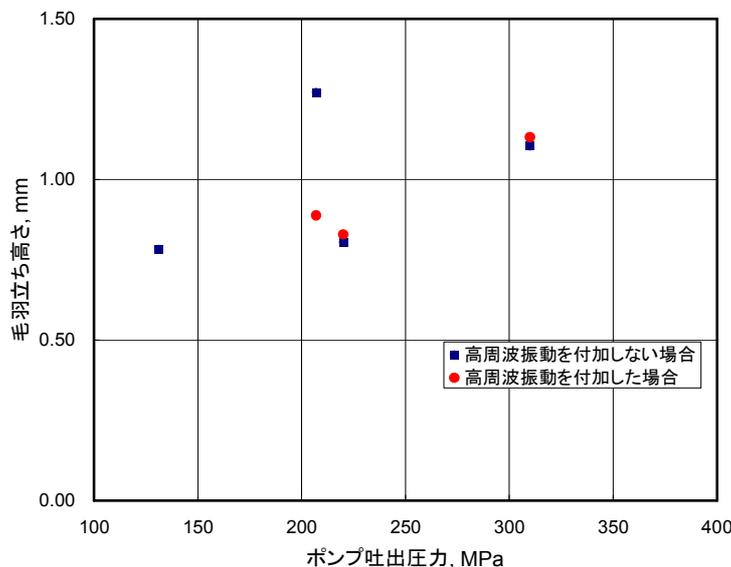


図 23 ポンプ吐出圧力と切削後の毛羽立ちの高さの関係

図 23 はポンプ吐出圧力と切削後の毛羽立ちの高さの関係を示す。ポンプ吐出圧力 310MPa と 221MPa は高周波振動の影響は受けない。ハイスピードカメラの可視化結果より、ポンプ吐出圧力 207MPa 状態の毛羽立ちの高さは、高周波振動付加しない場合 1.27mm、高周波振動付加した場合 0.89mm となり、30%減少した。

2-2-4 最適振動数と振幅の検討

超音波振動子の原理モデルによる各計測・試験の結果を受けて、28kHz分離タイプ、28kHz握りタイプ、40kHz分離タイプの3つの製品モデルを設計、製作した。

1) 製品モデルの振幅計測

製品モデルの振幅をロボットに取り付けた状態で計測した。

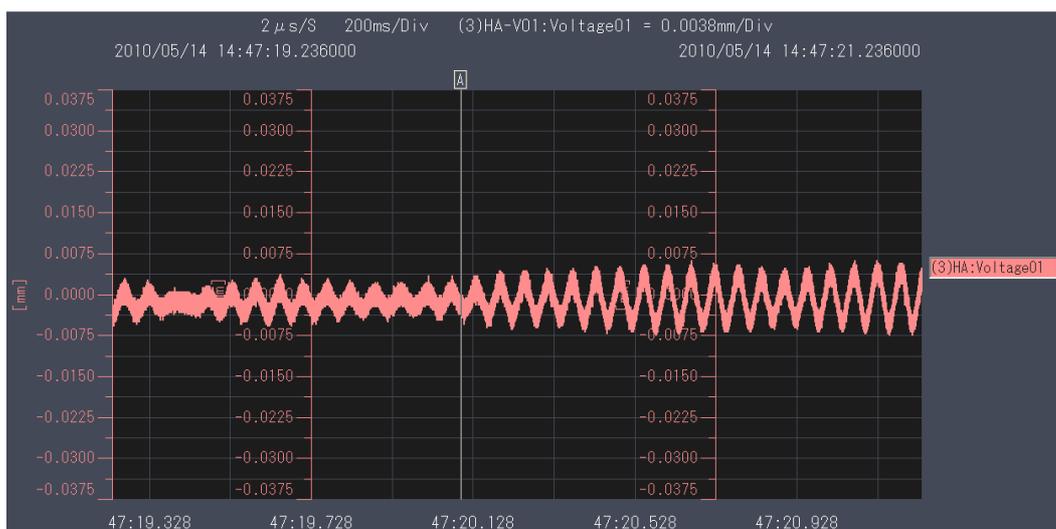


図 24 加振 OFF から加振 ON の状態の振幅計測結果(28kHz 握りタイプ)

図 24 は 28kHz 握りタイプで加振した場合の振幅計測結果である。振幅 $6\mu\text{m}$ から振動付加で振幅 $14\mu\text{m}$ に増加している。またグラフより握りタイプの振動は正波長であることから、ノズルチューブを超音波振動子により共振させている状態で振幅している。分離タイプの超音波振動子の振幅と比較すると安定した振幅である。最大の振幅を得たのは、28kHz 握りタイプであった。

なお、28kHz 分離タイプの場合は、加振させると振幅が $6\mu\text{m}$ から $11\mu\text{m}$ に増加するが、分離タイプの仕様上、振動子でノズルチューブを叩いている構造であるため、叩かれたノズルチューブが移動し元の位置へ戻ろうとするがまた叩かれ、元の位置より $20\mu\text{m}$ 程度ずれた位置で振幅する。

2) 超音波振動を付加したワーク切削試験

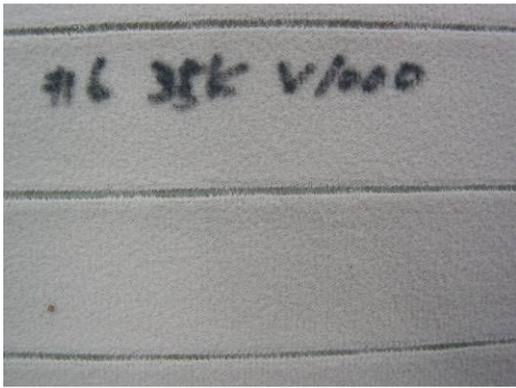
超音波振動子の製品モデルによる加振で、WJの切削能力等にどのような変化があるかをワークの切削テストを通して検証した。

a) 複合材

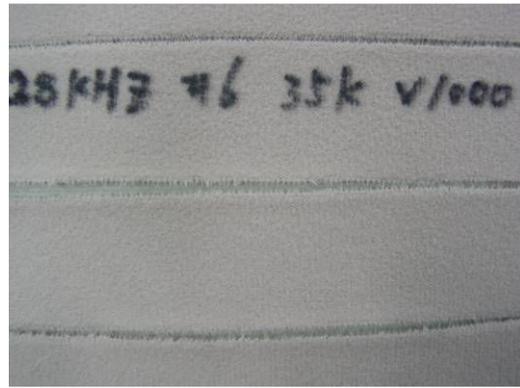
複合材については、PWJにて、28kHz 分離タイプ、28kHz 握りタイプ、40kHz 分離タイプの各振動子の加振による切削テストを実施し、切削効果の違いを検証した。

ア) 加振の有無による切削結果への影響

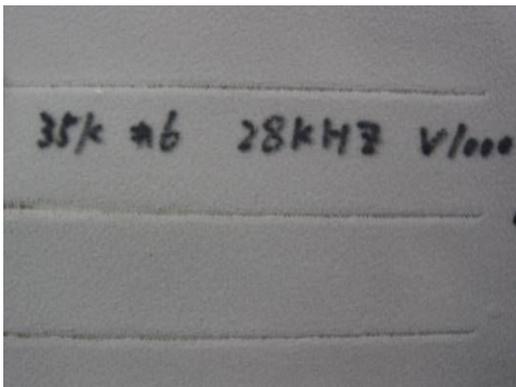
250MPa における同一ポンプ吐出圧力条件での加振有無の影響について検証した。



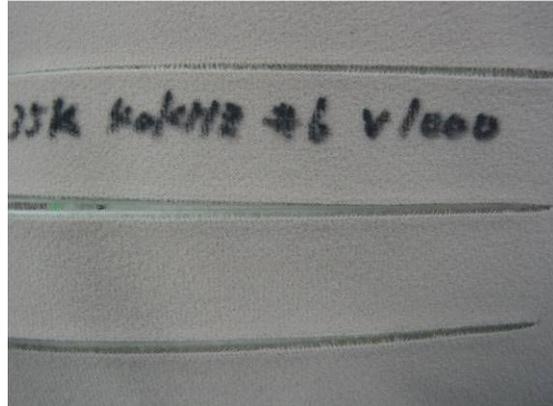
(a)加振なし



(b) 28kHz 握りタイプ



(c)28kHz 分離タイプ



(d) 40kHz分離タイプ

図 25 製品モデルの違いによる切削比較 (条件:圧力 245MPa, オリフィス径 6/1,000inch, 送り速度 1000mm/秒)

図 25 は製品モデルの違いによる切削比較である。図 25(a) (b)より、28kHz 握りタイプの場合、加振なし条件のほうが良い結果となった。図 25(c)(d)より、28kHzの分離タイプにおいては、加振の有無に関わらずほぼ同等の切削結果になり、40kHzの分離タイプにおいては振動付加することで切削効果があることが分かった。

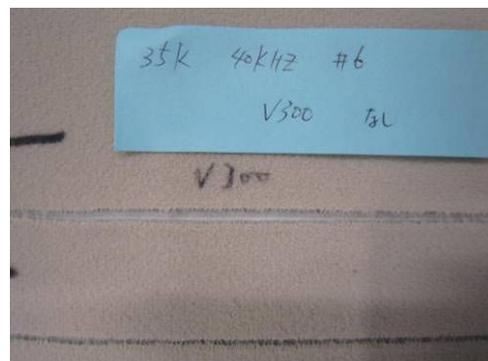
イ) 超音波振動付加と送り速度の影響

振動付加の有無での送り速度を比較した。これは主に振動付加による切削効果の評価をする為である。

i) オリフィス径 6/1,000inch での切削能力の比較



(a) 28kHz 分離タイプ加振 速度 600mm/秒

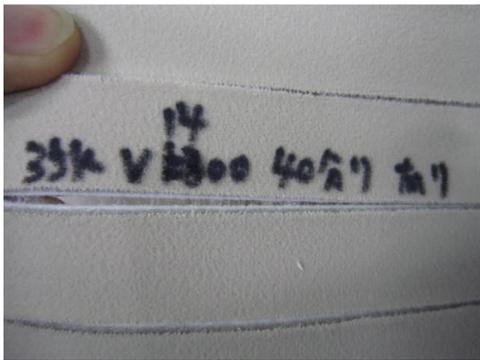


(b) 加振なし 速度 300mm/秒

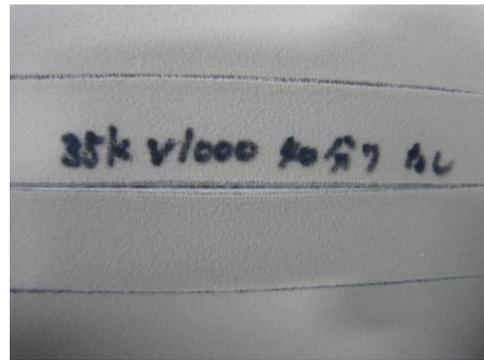
図 26 加振有無での切削比較(条件:圧力 245MPa オリフィス 6/1,000inch)

図 26 は 28kHz 握りタイプにおける振動付加、無しでの切削速度比較を示す。加振状態の方が切削速度を上げて効果があった。振動付加、無しの比較で、同条件(水圧、切削速度)では振動付加させた方が切断効果はよい結果が出た。切削速度で比較をすると、圧力 245MPa オリフィス径 6/1,000inch 場合、加振なしでは切削可能な最速の送り速度が 300mm/秒なのに対し、40kHz 分離タイプにて加振させると、最速で送り速度 600mm/秒 でも切削でき、加振させると切削速度が 2 倍程度アップした。

ii) オリフィス径 8/1,000inch での切削能力の比較



(a) 40kHz 分離タイプによる加振
送り速度 1,400mm/秒



(b) 加振なし
送り速度 1,000mm/秒

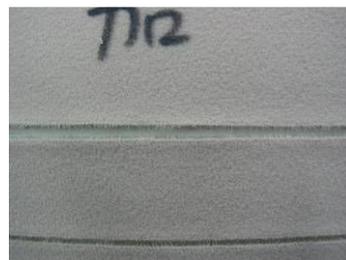
図 27 加振有無での切削比較(条件: 圧力 245MPa、オリフィス 8/1000inch)

図 27 は圧力 245MPa、オリフィス 8/1,000inch のときの、加振有無での切削結果比較である。振動付加なしの場合、最速送り速度は 1,000mm/秒だったのに対し、40kHz 分離タイプにより加振させた場合、最速送り速度 1,400mm/秒と、切削速度を高めることが出来た。28kHz 分離タイプで加振した場合も、同様に最速送り速度は 1,400mm/秒だった。

ウ) 超音波振動付加と圧力の影響



(a) 圧力 245MPa



(b) 圧力 210MPa

図 28 40kHz 分離タイプにおけるポンプ吐出圧力による切削比較
(条件: 210~315MPa、オリフィス径 6/1,000inch、送り速度 2,000mm/秒)

図 28 は 40kHz 分離タイプにおける吐出圧力違いによる切削痕の比較を示す。各ポンプ吐出圧力による切削痕の違いは水圧による切削効果の違いによるもので、加振による切削効果は確認できなかった。結果、加振させたことにより圧力を下げても切削可能であるかどうか見極めることは困難であった。技術目標値である 220MPa での切削は、今回使用した複合材では加振有り、無し共に糸残りが多く切削不可能という結果であった。試験結果より 245MPa 以上の水圧が必要

であると原理モデルテスト時と同様の判断をした。

b) 基板切削試験

AWJにてオリフィスを小径化させて切削することを目標として、切削結果の検証を行う。

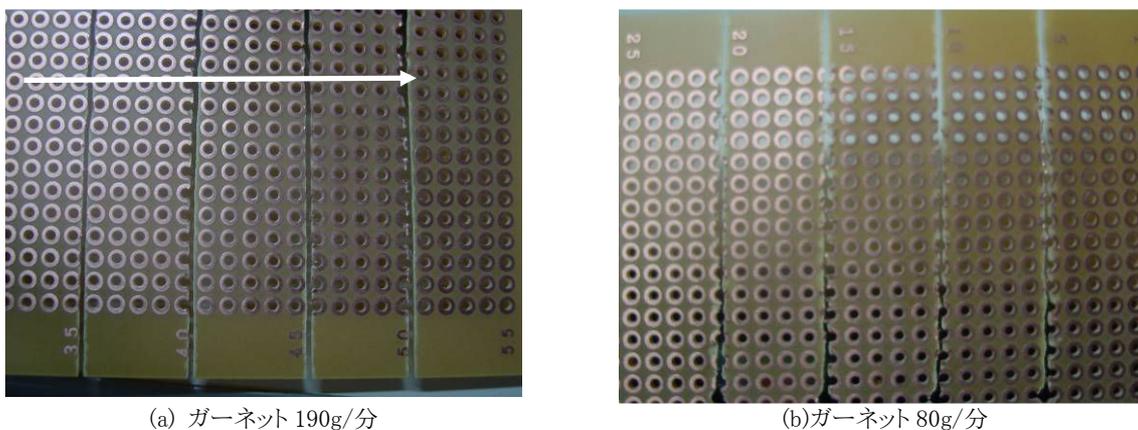


図 29 基板切削試験(条件: 圧力 280MPa, オリフィス径 8/1,000inch)

図 29 は基板切削試験の切断結果を示す。ポンプ吐出圧力は 280MPa, オリフィス 8/1,000inch, 切削速度は左から 80,100,120,140mm/秒である。図 29(a)から, 切削速度,140mm/秒で基板上の銅箔の剥離が発生した。図 29(b)から, 切削速度,100mm/秒で基板上の銅箔の剥離の発生を確認した。これにより、ポンプ吐出圧力 280MPa 時の、上記最低条件で切削できることが分かり、今後の検討課題である小径ノズル開発への貴重なデータを取得できた。なお、オリフィス 8/1,000inch はAWJでは既存のオリフィスの中で、最小径である。

2-2-5 管内圧力計測とキャビテーションの存在有無

1) 管内圧力計測

WJ ノズル内の圧力計測の目的は、高圧ポンプの設定圧力(吐出圧力)とノズル内圧力を測定し、配管路内の圧損を調べる事である。

図 30 はポンプ吐出圧力時における WJ ノズル内の圧力の時間履歴を示す。圧力計測はポンプ吐出圧力を 145, 180, 220, 270 及び 360MPa に設定した。水流はポンプより加圧された高圧水流が通りノズル下部のオリフィスより噴出し WJ の自由噴流(*13)を形成する。この時、高圧ポンプの設定圧力(吐出圧力)とノズル内圧力はほぼ等しく、圧損がない事が確認できた。図中 A 部の変動圧力はプランジャの動きを示している。圧送時のプランジャの変動周期はポンプ吐出圧力の上昇とともに早くなり、ノズル管内の一定水量を供給しているためである。

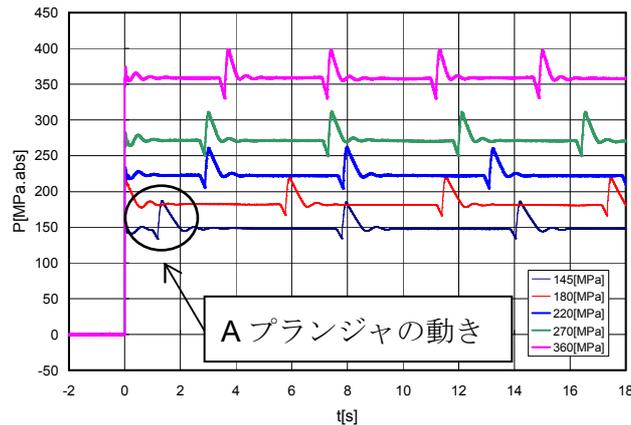


図 30 各種ポンプ圧力時における WJ ノズル内の圧力の時間履歴

2) レーザー散乱法によるキャビテーションの存在有無

レーザー散乱法を用いて、ノズルから出たPWJ流れにキャビテーションが存在するかを調べた。図31は、レーザー散乱法による可視化結果を示す。図31 (a)は対物レンズ1倍、オリフィス径6/1,000inch、ノズル形状 標準、図31 (b)は対物レンズ3倍、オリフィス径6/1,000inch、ノズル形状 標準、図31 (c)は対物レンズ3倍、オリフィス径8/1,000inch、ノズル形状 標準、図31 (d)は対物レンズ3倍、オリフィス径6/1,000inch、ノズル形状 スパイラルの結果である。

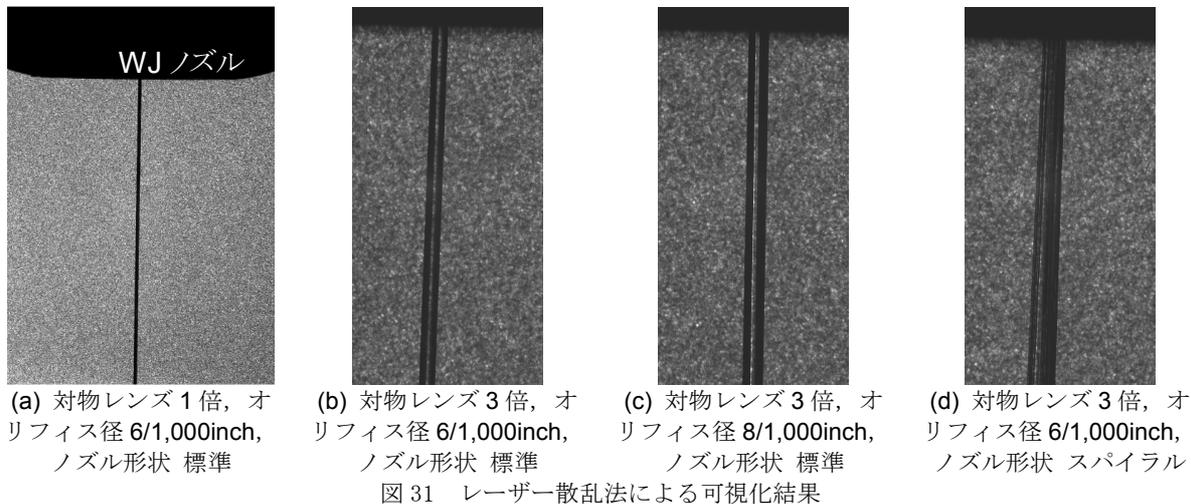


図 31 (a)から、対物レンズ 1 倍では、拡大率が足らず、ジェット流のみが確認できる。従って対物レンズの拡大率を 1 倍から 3 倍へ上げた。図 31 (b)と図 31 (c)から、WJ のジェット流の中心部では、透明な部分となり、ポテンシャルコア領域の存在し、両端の黒色部は流れに空気が混合していることが確認できた。図 31 (d)のノズル形状がスパイラルの場合、回転しながら噴流が形成され、流れ場は何本もの水柱が確認でき、標準ノズルでは見られなかった不規則な流れ場を形成している。オリフィス近傍から噴射口より離れるにつれて不連続流へ流動様式が遷移し、水流が乱れ広がり始める。これは、WJ ノズル内にスパイラル形状の

中子を挿入しているために、流路が狭まって、流れが乱され整流が出来なかったためである。

以上から WJ ノズルは標準ノズルの性能が一番良くなる事が確認できた。

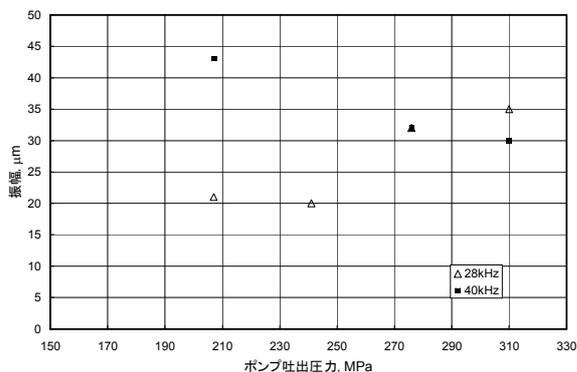


図 32 振動付加時のW J の噴流の変動

図 32 は振動付加時のW J の噴流の横方向の振れの変動を示す。この結果は、上記のレーザー散乱法を用いて、振動付加されたW J の噴流を対物レンズにより拡大可視化した結果より求めた。結果の整理をするに当たり、振動付加状態の 3 周期分の振れの平均値を取った。

可視化結果より、超音波振動付加によって横方向の振動はロボットアーム、取付け時の状態及びWJ プランジヤの衝撃などの影響により一様でないことがわかった。

超音波振動が 28kHz の場合、ポンプ吐出圧力 210 から 240MPa までは、振動振幅は 20μm となり、ほぼ一定である。ポンプ吐出圧力 270MPa 以上では振動振幅が約 35μm まで増加した。超音波振動が 40kHz の場合、ポンプ吐出圧力 210MPa では、振動振幅は 43μm である。しかし、ポンプ吐出圧力の上昇により、振動振幅が約 30μm まで減少した。

2-3 実用化への評価

製品モデルをWJシステムのロボットに取り付け、各部位への干渉等の影響をシミュレーションと実地で検証し、超音波振動している状態にて耐久試験を行い、最適条件を決定する。

2-3-1 取り付けとメンテナンス性の検討

完成した製品モデルをロボットに取り付け干渉や不具合部分の検討を行った。

1)問題点と改善事項

a)ブラケットとWJ配管との干渉

超音波振動子を取り付けるアルミ製ブラケットの一部がWJ高圧配管と干渉する。これは、大きな干渉ではないがユーザーで使用しているロボットと配管にあわせブラケットを設計する必要がある。

現状は、こすれ程度の干渉であるため大きな問題とはならない。

b)超音波振動子の取付について

分離タイプの振動子をセットする際に振動子をノズルに確実に当てる必要がある。そのために超音波振動子をノズルに押し付ける為の調整ネジがあるとよい。

28kHz 握りタイプは、AWJ、PWJで使い分けをする際にノズルと振動子の共振する部分に取り付けないと、過負荷であることや共振していないことを示すエラーが超音波ウエルダーから出る。ユーザーにて使用する場合、ノズルの長さに応じ取り付け位置、超音波発信機の出力調整が必要となる。

2-3-2 産業用ロボットの動作への影響

産業用ロボットに超音波振動子を取り付け、切削テストを含め 2 ヶ月間テストを行っているが現状不具合などは起きていない。

超音波振動がロボットに与える影響については、産業用ロボットは、可搬重量を基に衝撃、過負荷等を加味して設計されている。また、超音波振動は、振動子を振動させることにより先端のツールが振動し仕事をするが、ロボットへの取り付け部分は振動がゼロになる様に設計されている。したがって超音波振動は、ロボットを直接振動させるものではなく、ロボットも超音波振動レベルの振動に十分対応出来る事から問題ないと判断できる。

2-3-3 無負荷状態で産業用ロボットへ取り付けての動作確認

超音波振動子に耐水保護を施した取り付け条件にて任意時間の連続稼動を実施し、動作確認を行った。上記研究項目の検討は、項目2-3-4とあわせ研究を実施した。

2-3-4 負荷状態で産業用ロボットへ取り付けて連続切削実施

加振状態でロボットに取り付け連続切削をしているが、飛散等による大きな問題は起きていない。

製品モデルは製作段階からステンレス製のカバーとシールにより圧電素子内への飛散水混入を防ぐ構造で防水対策してある。実際に振動子本体に飛散水がかかった状態で運転を行ったが、防水に関連する問題は起きていない。また、握りタイプの振動ではノズルを共振振動させている為、振動子本体に 50%程度の付加がかかり振動子本体が発熱する現象があったが、振動子冷却用のエア配管を使用する対策を施し、不具合は解消されている

第3章 全体総括

3-1 まとめ

1) WJの流体解析と可視化計測

a) 数値シミュレーション

- WJノズル近傍の噴流はポテンシャルコア領域、噴流と周囲流体が混合する混合領域、乱流噴流の崩壊領域が確認できた。
- 噴流は雰囲気ガスとの大きな速度差と流体の粘性の作用によって、周囲の流体を巻き込み噴流幅を広げ、噴流速度が減少しながら下流方向へ流れていく。
- 標準ノズルは非常に性能が良く、キャビテーションの発生箇所が明らかになり、切削力が上昇する模様が確認できるようになった。
- オリフィス部入口で乱流エネルギーが高く、強い衝撃力が加わる。オリフィス部では、入口が一番磨耗し、次に管壁へ磨耗が増えていく事が予測できる。
- 無次元速度分布からオリフィスの性能が十分予測する事が可能である。

b) 圧力計測

- 高圧ポンプの設定圧力(吐出圧力)とノズル内圧力はほぼ等しく、高圧水が配管内を通る際に生じる圧損がない事が確認できた。
- 圧送時のプランジャの変動周期はポンプ吐出圧力の上昇とともに早くなり、ノズル管内の一定水量を供給しているためである。

c) レーザー散乱法を用いたハイスピードカメラでの可視化

- WJのジェット流の中心部では、透明な部分となり、ポテンシャルコア領域の存在し、両端の黒色部は流れに空気が混合していることが確認できた。
- 使用した対物レンズの拡大率が低く、詳細なキャビテーションの発生状況は確認できなかった。

2) ノズルの形状検討

- 標準ノズルはオリフィスより噴射される超高压水がオリフィス近傍よりすぐに乱れないことが分かり、切削加工の効率は非常に良い。
- WJノズル内に各種形状の中子を入れても、流路が狭まり、整流効果が得られず、切削効率向上はできなかった。
- ノズルの内径形状の変更による切削能力の向上を検討したが、WJの整流性切削能力、切削しろ、またノズル自体の消耗といった観点から、現状では標準ノズルが最も効率よく切削できるノズルで

あることが判明した。

3) WJノズルに対する超音波振動の付加について

a) ノズル振動付加の数値シミュレーションから

- ・28kHzという超音波振動を加える事で、ノズル出口での液相の割合が少なく、蒸気相が増加しキャビテーションを多く発生する事ができる。
- ・振動を付加する事で、ノズル出口部から噴出した流れ場の乱流エネルギーが増加し、切削力が向上する。

b) 原理モデルの振幅計測・ワーク切削テスト

- ・原理モデルとして、横型モデル(40kHz握りタイプ・28kHz分離タイプ)、縦型振動モデル(28kHzタイプ・19kHzタイプ)を製作した。
- ・握りタイプは、ノズルを共振させる構造であり、振動子に負荷がかかりやすく、製品モデルでは振動子冷却エアーにより振動子の発熱を防ぐ構造とした。
- ・振動子の取り付け位置により振幅伝達に変化があった。
- ・40kHz握りタイプでは、加振なし条件のほうが良い結果となった。

c) 製品モデルの振幅計測

- ・超音波による振幅、周波数の大小と高圧水の圧力に関連性が有ることが分かった(条件に応じて振幅、周波数を変更していく必要がある)
- ・PWJでの複合材切削においては、超音波振動の振幅が大きい事とその際の切削効果に関連はなかった。
- ・AWJでのアルミニウム板貫通試験では、超音波振動の振幅が大きいほど切削効果があった。
- ・上記2点の結果は、28kHz 握りタイプの振幅が一番大きかった結果より判断できる。

d) 製品モデルでのワーク切削テスト

- ・PWJでの複合材の切削については、加振周波数、加振方法の違いによる比較から圧力 210MPa の際に 40kHz 分離タイプで加振させた場合の切削効率が最も良かった。
- ・同条件での速度比較は出来たが、加振させたことにより圧力を下げても切削可能であるかどうか見極めることは困難であった。
- ・製品モデル分離タイプには、加振有無と圧力とに次のような相関性があった。
 - 28kHz 分離モデルの場合、280MPa より低水圧では切削結果が加振しない時より劣るが、280MPa よりも高水圧では、切削効果が加振しない時より優れる傾向がある。
 - 40kHz 分離モデルの場合、280MPa より低水圧では切削結果が加振しない時より優れてい

るが、280MPa よりも高水圧では、切削効果が加振しない時よりも劣る傾向がある。

・AWJでのアルミニウム板の貫通試験では加振により切削速度の向上が確認された。

3-2 研究開発後の課題・事業化展開

本研究の成果として、WJのノズルチューブに超音波振動子を取り付け加振させた結果、以下の未達成点と課題が判明した。これらの問題点を解決し、超音波振動を効果的に水流に伝達させる新しいWJシステムの開発を行うことが今後の課題である。

3-2-1 課題

1) 超音波振動によるパーツの消耗

超音波振動によりパーツ同士の接続箇所で摩擦熱が発生し、振動が損なわれていることが分かった。PWJの場合は、特にノズル、オリフィス、ノズルナットの接合部で、超音波で加振することにより発熱する。この発熱は、超音波による振動とノズルの振動が共振する際に発生し、特に握りタイプの振動子では必ず発生した。握りタイプの振動子はノズルを共振させる構造で有る為、加振後 2 分程度で 60℃まで発熱することも分かった。また、AWJについては、ノズルアセンブリの接続・締結の構造上、フォーカシングチューブが脱落するトラブルが発生する、パーツの接続箇所で振動が摩擦に変わりうまく伝達しないなどといった問題があることも判明した。

これらの問題を解消し超音波振動をより効果的に水流にまで伝達させるため、現在のノズルアセンブリ各パーツの接続・締結方法を改善する必要がある。

2) WJシステムの持つ複合的な振動の解明と振幅伝達の最適化

ノズルを超音波で加振させても、予測したほどの振幅が得られなかった。これは、ロボットのサーボモーターの振動、ポンプに由来する振動、ロボットの挙動による振動等、他に由来する振動が複合的に作用した結果と思われる。この複合的な振動を他の方法にて計測し詳しく解析することにより、切削能力の向上に最適な振動を与えるための施策が見出せるのではないかと思われる。

3) AWJの切削能力向上について

金属の切削に関しては、AWJを超音波で加振し切削した場合、振動がない場合と比較して原理モデル試験結果より平均 9 秒速く貫通することができた(アルミニウム 40mm 厚の貫通切削)。しかしながら、従来使用している研磨材(ガーネット)は粒子が大きく硬度も低いため、切削しろを縮小するためには、研磨材の材質・硬度・粒子の細かさ等を見直すとともに、新しく選定した研磨材の硬度等に耐えうる仕様のフォーカシングチューブを設計・製作する必要がある。

3-2-2 事業化展開

現在までの本事業の成果、達成度から考慮して、商品化には多くの課題が残されている。今後の事業化に向けて、補完研究を通して前述の課題を解決させる。その後、川下製造業者においてフィールドテスト、ランニングテストを実施し、研究成果にユーザーの声を反映させ、商品化、市場投入へ向かうこととする。

なお、本事業での成果と課題を発展的に解決させる内容で、平成 22 年 4 月に法認定計画の変更申請ならびに平成 22 年度サポイン事業への提案申請を行っている。

1)PWJシステムについて

現時点でターゲットとして期待出来る、市場、商品、事業形態は以下の通りである。

①現在稼働中のPWJ+3次元ロボットシステム(複合材等)市場

商品:加振装置及び加振用新規開発ノズル(従来形状)販売、システムリビルト

②新規PWJ+3次元ロボットシステム(複合材等)市場

商品:加振装置+加振用新規開発ノズル(従来形状)+PWJ

+3次元ロボットシステム販売

変更後の法認定計画では、PWJの本事業のフィールドテストを、平成 23 年 1 月頃を目処にアドバイザーで川下製造業者のトヨタ紡織株式会社にて実施する予定としている。フィールドテストの結果をフィードバックした後、平成 23 年度中には、複合材メーカーに対して超音波振動子と専用ノズルのサンプル出荷を行う予定である。

2)AWJシステムについて

今後の開発進行によって、市場、商品、事業の拡大が予想されるが、現時点でターゲットとして期待出来る、市場、商品、事業形態は以下である。

①現在稼働中のAWJ+XY テーブル(*14)(金属加工等)市場

商品:加振装置及び加振用新規開発ノズル(従来形状)販売、システムリビルト

②新規AWJ+XY テーブル(金属加工等)メーカー市場

商品:加振装置+加振用新規開発ノズル(従来形状)販売

③細径ノズルAWJ市場

商品:加振装置+加振用新開発ノズル(開発形状)販売

変更後の法認定計画では、AWJ向け超音波振動子と専用ノズルのランニングテストについて、平成 24 年 1 月以降に、切削機械メーカーの澁谷工業株式会社にて実施する予定である。

補足

1 参考文献

1. アンシス・ジャパン編「FLUENT12 ユーザーズ ガイド」
2. 数値流体力学編集委員会編, 「乱流解析」, 東京大学出版会, 1995
3. 大宮司 久明, 三宅 裕, 吉澤 徹著, 「乱流の数値流体力学 モデルと計算法」, 東京大学出版会, 1998
4. 加藤 洋治著, 「キャビテーション 基礎と最近の進歩」, 槇書房, 1999
5. H. Liu et al., "A study of abrasive waterjet characteristics by CFD simulation", J. Materials Processing Technology 153–154 (2004) 488–493
6. R. Wang, M. Wang, "A two-fluid model of abrasive waterjet", J. Materials Processing Technology 210 (2010) 190–196
7. Z. Sun et al., "Experimental system of cavitation erosion with water-jet", Materials and Design 26 (2005) 59–63
8. G. Huang et al., "Reaction thrust of water jet for conical nozzles", J. Shanghai Univ (Engl Ed), 2009, 13(4): 305–310
9. Z. Qin et al., "Simulation of cavitation bubbles in a convergent–divergent nozzle water jet", J. Fluid Mech., 573 (2007), 1–25
10. J. Foldyna et al., "Utilization of ultrasound to enhance high-speed water jet effects", Ultrasonics Sonochemistry 11 (2004) 131–137

2 脚注

*1〔ウォータージェット(WJ)〕

0.3MPa(水道水程度の圧力)の水を高性能ポンプにより 300MPa 程に加圧し、0.1mm~1.0mm 程の小さな穴を通して得られる細い高速流水。これを用いて切削などの加工を行うことをウォータージェット切削(切断・加工)、または、刃物のように切断されるためウォーターカッター(water cutter)とも言う。水流の速度は、多くの場合 500~800m/秒程度であるが、990m/秒に達する高速なものもある。水の圧力を落とし、金属面やガラス面についた汚れを落とすこともできる。なお、水のみで切削する方法をピュアウォータージェット(PWJ)切削、研磨剤を混入させ金属などを切削する方法をアブレッシブウォータージェット(AWJ)切削という。

*2〔ロボット(設備)〕

産業用 6 軸ロボットにノズルを取り付けたWJ切削加工設備であり、立体的な切削が可能であるという特徴がある。ロボット設備 1 基に対し、6 軸ロボットを 1~4 台取り付け、自動運転にて同時にロボットが起動し切削を行う。なお「産業用ロボット」とは、ティーチングプレイバックという方法で動作する産業用機械を指す。しかし、最近では人間の代わりに作業をする機械としての役割が重視されることから、ある程度自律的に動作する人間の腕に似た機械、として解釈されるのが一般的である。ISO では「3 軸以上の自由度を持つ、自動制御、プログラム可能なマニピュレータ」と定義されている。

*3〔ノズル〕

液体や気体を噴出させる細い管。流体のもっているポテンシャル・エネルギーを効率よく速度エネルギーに変換し、高速噴流を得る装置である。流体を噴出させるとき、噴出断面積を小さくすると圧力エネルギーが速度エネルギーに変わることを利用したもの。ここでは、本開発による超音波振動を組み込んだ高圧水噴射部分を示す。

*4〔複合材〕

本報告書においては、複合材のうち、天井部分の内装パーツ(天井材)を指す。具体的には、表皮(布)、ウレタン、グラスウール、不織布を順に重ね、圧縮して層状にしたもので、主にPWJで切削する。厚みは約 4mm。

*5〔オリフィス〕

流体が噴出している開口部。また流量を測定するため、水槽の壁面や管路の途中に設ける小さな流水口。WJで使用されるオリフィスは主に人工ダイヤモンドまたは人工サファイア製である。

*6 実施内容欄の数字は次の内容を示す。

【1】…研究項目1 高効率専用ノズルの設計と製作

【2】…研究項目2 WJ専用超音波振動子の開発

【3】…研究項目3 実用化への評価

【4】…研究項目4 プロジェクトの管理・運営

*7 第2章の各項目は、実施計画書の研究項目に対して下記の通り対応している。

第2章項目	研究内容	実施計画書の研究項目
2-1	高効率ノズルの設計と製作	1
2-1-1	数値流体力学を用いたノズル形状の決定	1-1
2-1-2	ノズル形状の実験的検証	1-2
2-2	WJ専用超音波振動子の開発	2
2-2-1	超音波振動子の開発と既存ノズルへの適応	2-1
2-2-2	繰返し衝撃力発生による切削性と貫通力の向上	2-2
2-2-3	ハイスピードカメラを用いた可視化(流れと切削現象)	2-3
2-2-4	最適振動数と振幅の検討	2-4
2-2-5	管内圧力計測とキャビテーションの存在有無	2-5
2-3	実用化への評価	3
2-3-1	取り付けとメンテナンス性の検討	3-1
2-3-2	産業用ロボットの動作への影響	3-2
2-3-3	無負荷状態で産業用ロボットへ取り付けての動作確認	3-3
2-3-4	負荷状態で産業用ロボットへ取り付けて連続切削実施	3-4

*8[乱流]

流体が不規則に乱れて運動する状態。乱流は非線形散逸系の現象であり、平均流が失う運動エネルギーの大部分は、流れの乱れのエネルギーに変換されるときエネルギーである。

*9[ナビエ-ストークス方程式]

運動方程式とも言われ、流体の運動を記述する 2 階非線型偏微分方程式であり、流体力学で用

いられる。ナビエが 1827 年、ストークスが 1845 年に導いた。

*10〔有限体積法〕

流体解析コードに標準的な離散化解析手法である。解析領域をセルという小領域に分割し、セルの格子点を中心とする領域であるコントロールボリュームを定義する。支配方程式は積分型で定式化されるので、コントロールボリューム領域内の物理量の保存則が満たされる。コントロールボリュームが重ならないかぎり、領域全体での保存則も満たされる。

*11〔キャビテーション〕

液体の流れの中で圧力差により、飽和蒸気圧以下になると液中から気化して、気泡や空洞が短時間に発生と消滅が起きる物理現象。

*12〔SUS316〕

SUS316 は 18%の Cr と 12%の Ni を含み、それにモリブデン(Mo)を添加して耐食性、耐孔食性をさらに向上させたステンレス鋼

*13〔自由噴流〕

平面形状ノズルあるいは円形のノズルから噴流を無限に広い同一流体の静止空間中に噴出させたときにできる流れ。自由噴流領域はポテンシャルコア領域、発達領域、完全発達領域に分類できる。

*14〔XYテーブル装置〕

平面テーブル上、X軸、Y軸(縦・横)方向に作動する 1 軸電動スライダ 2 ヶを具備するWJ切削加工設備であり、平面加工に特化した設備である。