

平成 22～23 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

鋳物製造における劣悪作業改善・作業効率向上させる
低負荷環境型バリ取り装置の開発

研究開発成果等報告書

平成 2 4 年 3 月

委託者 経済産業省北海道経済産業局
委託先 株式会社北海道二十一世紀総合研究所

目 次

第 1 章 研究開発の概要	1
1. 研究開発の目的と内容	1
2. 研究体制	5
第 2 章 研究開発の内容	10
1. ウォータージェットによるバリ取り装置の開発	10
1. 1 装置開発	10
1. 2 各種試験の結果	23
1. 3 ウォータージェット装置 ワーク切断テスト	31
2. 噴射ノズルの耐摩耗材料の開発	37
2. 1 合金組成の選定	37
2. 2 各種摩耗試験	38
2. 3 開発材による噴射ノズルの開発	42
2. 4 難削材の切削条件などについての検討	46
3. ならい制御装置の開発	48
3. 1 ウォータジェットノズル制御	48
3. 2 倣い装置の改良	49
4. 水回収および防錆剤の製品への影響調査	51
4. 1 大型鋳物への防錆剤の影響調査	51
4. 2 小型鋳物への防錆剤の影響調査	53
4. 3 水回収装置による切削水の再利用	53
5. 事業化への検討	55
6. 総括	56

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) 実施内容の細目

1) 研究の目的

自動車、工作機械などの川下産業では、鋳物のグローバル調達化が進み、鋳物メーカーに対するコスト低減要請が益々厳しくなってきた。大企業の鋳物工場では、自動化によりコスト低減が図られているが、小ロット中心の鋳物メーカーでは、人手に頼らざるを得ず、コストダウンに限界がある。

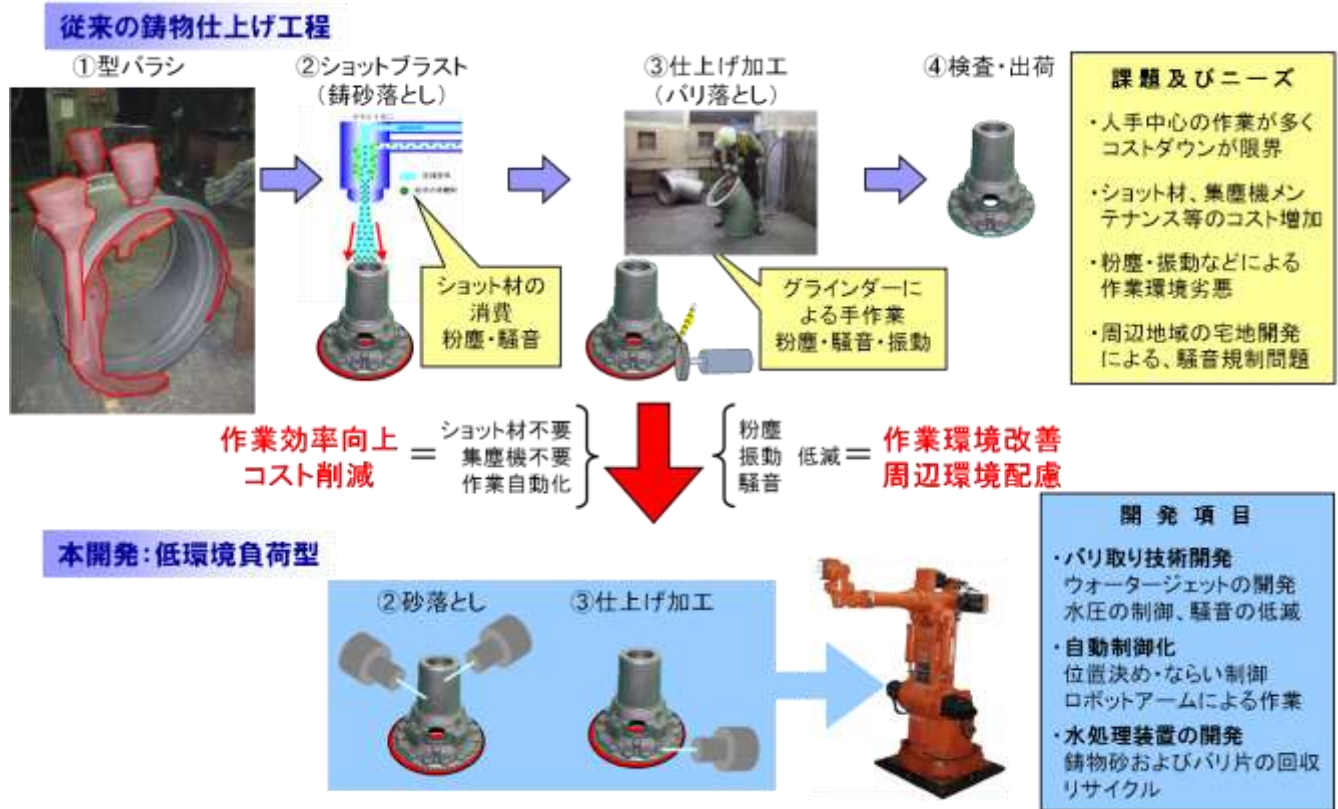
鋳物工場における、砂型鋳物は、生型、自硬性鋳型、加熱硬化鋳型などに分類され、古くから利用された鋳造法である。代表的な例として生型鋳物における各工程について下記のように示す。

鋳型から取り出した後の処理工程には、(1) 型砂および中子砂を除去する砂落とし作業、(2) 湯口、押湯、バリなどを除去するバリ取り作業などの後処理工程が必要となる。従来では、砂落とし工程では、研掃材を用いたショットブラスト処理を行い、バリ取り工程では、グラインダーを用いた手作業で行われる。またはバリ取り工程では一部 NC 制御の自動化装置を用いる。これらの工程は、粉じん振動、騒音が発生し、劣悪な作業環境である。鋳物業者は中小企業が多く、作業改善を試みるために、集じん機導入などの設備投資が行われているが、効果が現れにくく、自動化、省人化が遅れているのが現状である。最近では、後処理工程において、自動化、省人化推進を目的として、マニピュレーターおよびシーケンスロボットなどが採用され、重筋作業の効率化のほかに、粉じん、高熱という劣悪環境を作業員から隔離し、作業員の労働環境の向上を図ることが可能となったが、従来からの粉じん、振動、騒音などの環境は改善されていない。

このような社会背景から、本研究開発では、鋳物製造における劣悪作業改善・作業効率向上させる低負荷環境型バリ取り装置を開発し、重筋、振動を伴う劣悪作業の効率化、作業環境の改善（職業病解消等）を図る。

2) 研究の概要

自動車、工作機械などの川下産業では、鋳物のグローバル調達化が進み、鋳物メーカーに対するコスト低減要請が益々厳しくなってきた。大企業では、自動化によりコスト低減が図られているが、小ロット中心の鋳物メーカーでは、人手に頼らざるを得ず、コストダウンに限界がある。本研究では、鋳物製造における劣悪作業改善・作業効率向上させる低負荷環境型バリ取り装置を開発し、重筋、振動を伴う作業の効率化、作業環境の改善を図る。



3) 実施内容

①ウォータージェットによるバリ取り装置の開発

(株式会社村瀬鉄工所、佐藤鋳工株式会社、国立大学法人室蘭工業大学)

①-1. 小型ウォータージェットによるバリ取り装置の開発

従来からあるウォータージェット切断装置は、重く(市販品重量約 1,500～2,000kg)移動が困難である(耐圧ホースの長さや圧力損失から切断場所近くまで装置を運ぶ必要がある)。本研究開発では、小型軽量(約 1,000kg)で高圧水(600MPa)を発生するウォータージェット切断装置を目指して、機械式シングルシリンダー加圧装置や耐摩耗性に優れた超高圧水用ノズルを開発した。開発に当たっては、装置設計を室蘭工業大学で行い、装置製造は外部業者に発注して行った。

平成 22 年度に試作したウォータージェット切断装置は、従来のウォータージェット切断機と比較して、加圧機構をサーボモーター＋ボールネジとしており、水圧の制御が容易であるものであり、目的である、セキ、湯口の切断が可能であることが判明した。しかし、ダブルシリンダーであるため本体が大型化しており、設置場所が限定されてしまうなどの課題点があった。

そこで平成 23 年度では、シングルシリンダー化した小型化ウォータージェットの開発に取り組んだ。平成 22 年度の課題としてあげられた、研

削材の使用量の調整や、切断面の粗さに繋がる脈動の抑制、切断速度の向上、圧力上昇までの時間の低減など更なる改良を行った。

その結果、大型鋳物用ウォータージェット切断装置では、厚さ 90mm 程度の湯口まで切断することが可能となった。さらに、改修の結果、高圧水吐出量増加、砥粒最大量増加、砥粒径増により切断力が約 4 倍に向上した。

また、小型鋳物用ウォータージェット切断装置では、シングルシリンダー化による本体の小型化、またノズルの先端形状の新規開発を行い、小型鋳物のバリ取りに適用が可能となった。

①-2. ワーク専用治具の開発

鋳造物（ワーク）には、寸法公差があり仕上がり製品に個体差がある。そのため、従来の固定治具によるバリ取りを行うと、寸法変化、製品損傷などの恐れがある。ウォータージェットバリ取り装置のアームの可動範囲外となる部分について切断を行うため、専用の治具を開発した。

小型鋳物であるデフケースのバリ取りのため、サーボモータ駆動による回転テーブル及び治具を設けた専用ワークテーブルを開発し、寸法公差がある鋳物に対応し、切断効率が向上した。

①-3. 騒音低減化対策

水圧の上昇に伴い発生するウォータージェット装置本体からの騒音および、切断部の騒音に対しての対策を施す。具体的には、本体内部における防音、吸音材設置などの措置や、作業環境から WJ 本体の据付場所の隔離、切断部の騒音に対しては、防護柵など作業者および周辺環境改善へ向けての検討を行った。

結果として、佐藤鋳工に設置した小型鋳物用ウォータージェット切断装置において、騒音の発生源となる切断部（ノズル制御部およびワーク回転台）を囲い、操作に必要な開口、メンテナンス用の扉を設置、排気ダクトを設けることによる騒音対策を行った。

②噴射ノズルの耐摩耗材料の開発

（佐藤鋳工株式会社、国立大学法人室蘭工業大学）

水が高圧で挙動するノズル部分は、高圧水によるエロージョン摩耗が発生しやすく低寿命となる。超硬合金製の高圧水ノズルの場合は、寿命が約 1 時間と短い（ダイヤモンド製は、寿命が長いが価格が 10 倍となる）。今回開発するウォータージェット切断機の場合は、超高圧水（600MPa）を目指しており、今までの 400MPa に比べて、さらにノズルの消耗が激しくなる。

そこで、バナジウム(V)、クロム(Cr)、ニッケル(Ni)などの金属元素を調整・配合(合金配合設計)し、硬質な炭化物が微細に、しかも粒状として基地組織中に分散した耐摩耗性材料の開発を行った。

その結果、滑り摩耗においては従来品である炭素鋼と比較して 5 倍、エロージョン摩耗においては一般鋳鉄の 10 倍もの耐摩耗性を有する材料の開発に成功した。

③ならい制御装置の開発

(株式会社村瀬鉄工所、佐藤鋳工株式会社、国立大学法人室蘭工業大学)

市販のシングルアームロボットを利用・改造して、遠隔操作にて鋳物のバリおよび湯口を切断できるようにするため、ならい装置の設計を実施。

大型鋳物用としては、プログラムのパターン化、WJ 本体とロボットの連動、切断後の自動終了など作業省力化、自動化へ向けて更なるマンマシンインターフェースの改良を行った。その結果、位置認識タッチセンサーによるならい制御が可能となり、ウォータージェット切断ノズルを有したロボットアームによる自動切断が可能となった。

また、小型鋳物用のウォータージェット機器については、ならい装置として、X, Y, Z 座標の設定を単純化させた生産速度重視の装置を検討した。

④水回収および防錆剤の製品への影響調査

(株式会社村瀬鉄工所、佐藤鋳工株式会社、国立大学法人室蘭工業大学)

ウォータージェットによる鋳物バリ取りおよびショットブラスト（砂落とし）において発生する鋳物砂および混合したグラインダ屑などの回収を目的とした水回収装置の検討を行った。ウォータージェットの切断においては、水を使用するため、ワークに錆が発生する。

平成 22 年度は、錆を抑制するために、防錆剤の製品への影響調査を行い、pH11 付近がもっとも効果のある値となった。平成 23 年度は、継続して防錆剤の影響調査を行った。

また、水溶性切削油剤の使用なども考慮した結果、防腐剤や切削油を添加した吐出水を使用することで、ウォータージェットバリ取り作業における鋳物の防錆が確認された。さらに、一度使用した切削水を水回収装置、砥粒沈殿槽を設け、濾過することによって、切削水の再利用が可能となった。

⑤プロジェクトの管理運営

(株式会社北海道二十一世紀総合研究所)

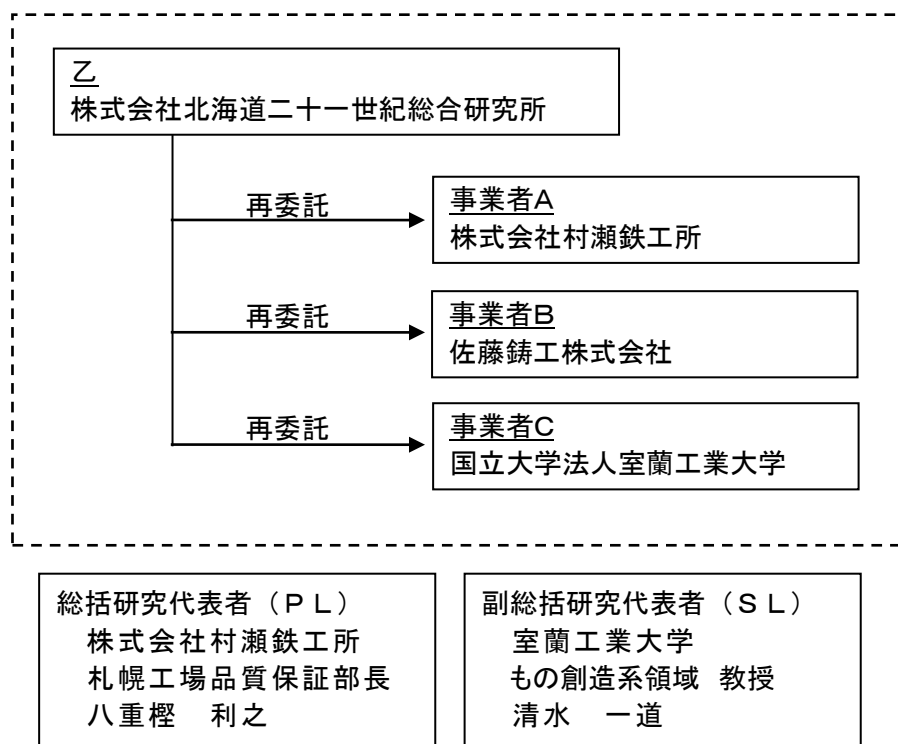
プロジェクトの円滑なる運営のため、研究開発委員会など打合せ機会の日程調整、プロジェクト参加機関間の各調整、プロジェクトの進捗管理、プロジェクトの予算管理などを実施した。

(2) 委託期間

平成 22 年 7 月 12 日 ～ 平成 24 年 3 月 30 日

1－2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制



(2) 管理員及び研究員

【事業管理者】株式会社北海道二十一世紀総合研究所

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
原田 実	取締役調査研究部長	⑤
布川 勝治	調査研究部主任研究員	⑤

【再委託先】

株式会社村瀬鉄工所

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
八重樫 利之	品質保証部長	①③④
渋谷 真人	製造管理係長	①③④
和泉 孝之	製造管理課員	①③④
斎藤 英登	品質保証課長	①③④

佐藤鋳工株式会社

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
清水 孝幸	製造部次長	①②③④
八谷 和夫	専務付特命部長	①②
中道 邦弘	品質保証部技術課係長	①③
三浦 孝之	品質保証部品質管理課課長	①②
菊野 幸男	製造部製造 2 課課長	①③
佐橋 信明	総務部部長	①④
川村 政信	品質保証部技術課課長	①②③
池川 勝	製造部製造 1 課鋳造1Gr主任	②
原 幸雄	製造部製造 1 課鋳造1Gr	②

国立大学法人 室蘭工業大学

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
清水 一道	もの創造系領域 教授	①②③④

(3) 研究支援体制

■検討委員会 参加者名簿

(委員) 木口 昭二 近畿大学理工学部機械工学科 教授

野口 徹 室蘭工業大学 理事・副学長

(プロジェクトメンバー)

村瀬 充 株式会社村瀬鉄工所 代表取締役社長

八重樫 利之 株式会社村瀬鉄工所 品質保証部長 (総括研究代表者)

大平 亮 株式会社村瀬鉄工所 札幌工場総務課長

佐藤 孝造 佐藤鋳工株式会社 代表取締役社長

清水 孝幸 佐藤鋳工株式会社 製造部次長

佐橋 信明 佐藤鋳工株式会社 総務部長

清水 一道 室蘭工業大学 もの創造系領域材料工学ユニット 教授
(副総括研究代表者)

原 宏哉 室蘭工業大学 機械航空創造系学科材料工学コース 研究員

(オブザーバー)

横山 正頼 大銑産業株式会社 取締役鋳物本部長

(事務局)

原田 実 株式会社北海道二十一世紀総合研究所 取締役調査研究部長

布川 勝治 株式会社北海道二十一世紀総合研究所 主任研究員

1-3 成果概要

①ウォータージェットによるバリ取り装置の開発

(株式会社村瀬鉄工所、佐藤鋳工株式会社、国立大学法人室蘭工業大学)

①-1. 大型ウォータージェットによるバリ取り装置の開発

小型軽量(約 1,000kg)で高圧水(600MPa)を発生するウォータージェット切断装置を目指して、機械式ダブルシリンダー加圧装置や耐摩耗性に優れた超高圧水用ノズルを開発。開発したウォータージェット切断装置では、厚さ 90mm 程度の湯口まで切断することが可能となった。

従来のバリ取り作業と比較して、湿式であり粉塵が舞わなく、作業環境が改善されることが見込まれ、作業者の負担が極めて少なく、省力化を実現した。

①-2. 小型ウォータージェットによるバリ取り装置の開発

シングルシリンダー化した小型化ウォータージェットを開発。シングルシリンダー化による本体の小型化、またノズルの先端形状の新規開発を行い、小型鋳物のバリ取りに適用が可能となった。

①-3. ワーク専用治具の開発

小型鋳物であるデフケースのバリ取りのため、サーボモータ駆動による回転テーブル及び治具を設けた専用ワークテーブルを開発し、寸法公差がある鋳物に対応し、切断効率を向上した。

①-4. 騒音低減化対策

小型鋳物用ウォータージェット切断装置のウォータージェット切断時に発生する騒音を防止するため、騒音の発生源となる切断部(ノズル制御部およびワーク回転台)を囲い、操作に必要な開口、メンテナンス用の扉を設置、排気ダクトを設けることによる騒音対策を行った。こうした対策により、騒音の発生は抑制された。

②噴射ノズルの耐摩耗材料の開発

ウォータージェット切断噴射ノズル用の耐摩耗材料として、バナジウム(V)、クロム(Cr)、ニッケル(Ni)などの金属元素を調整・配合(合金配合設計)し、硬質な炭化物が微細に、しかも粒状として基地組織中に分散した耐摩耗性材料の開発を行った。

開発に当たっては、摩耗寿命を 12 時間、価格を従来のダイヤモンドノズルの半値以下となる噴射ノズルの開発を目標として開発を行った。

実験の結果、開発材料である耐摩耗材料 2 は、滑り摩耗においては従来品である炭素鋼と比較して 5 倍、エロージョン摩耗においては一般鋳鉄の 10 倍もの耐摩耗性を有することが判明した。

難削材といわれる耐摩耗材料の切削加工が、加工に際して、工具傾斜角 10° 前後に傾

斜させることで、十分に可能であることが判明した。

③ならい制御装置の開発

大型鋳物用として、位置認識タッチセンサーによるならい制御が可能となり、ウォータージェット切断ノズルを有したロボットアームによる自動切断が可能となった。

ティーチング動作や切断作業までの流れが複雑であるため、ウォータージェット本体とロボットの連動、切断後の自動終了など作業省力化、自動化へ向けて更なるマンマシンインターフェースの改良を行い、従来 11 工程あった作業が 6 工程短縮されることによって、作業効率の改善および作業従事者への負担低減となった。

④水回収および防錆剤の製品への影響調査

防腐剤や切削油を添加した吐出水を使用することで、ウォータージェットバリ取り作業における鋳物の防錆が確認された。

一度使用した切削水を水回収装置、砥粒沈殿槽を設け、濾過することによって、切削水の再利用が可能となった。

1－4 当該研究開発の連絡窓口

①事業管理者の連絡窓口

所属	株式会社北海道二十一世紀総合研究所
役職	取締役調査研究部長
氏名	原田 実
電話	011-231-3053
FAX	011-231-3143
E-mail	harada@htri.co.jp

②開発実施者の連絡窓口

■総括研究代表者

所属	株式会社村瀬鉄工所
役職	札幌工場品質保証部長
氏名	八重樫 利之
電話	011-791-1187
FAX	011-791-5185
E-mail	yaegashi@murase-cast.co.jp

■副総括研究代表者

所属	室蘭工業大学
役職	もの創造系領域 教授
氏名	清水 一道
電話	0143-46-5651
FAX	0143-46-5651
E-mail	shimizu@mmm.muroran-it.ac.jp

第 2 章 研究開発の内容

1. ウォータージェットによるバリ取り装置の開発

従来からあるウォータージェット切断装置は、重く（市販品重量約 1,500～2,000kg）移動が困難である（耐圧ホースの長さや圧力損失から切断場所近くまで装置を運ぶ必要がある）。平成 22 年度に試作したウォータージェット切断装置は、従来のウォータージェット切断機と比較して、加圧機構をサーボモーター＋ボールネジとしており、水圧の制御が容易であるものであり、目的である、セキ、湯口の切断が可能であることが判明した。しかし、ダブルシリンダーであるため本体が大型化しており、設置場所が限定されてしまうなどの課題点があった。

そこで平成 23 年度では、シングルシリンダー化した小型化ウォータージェットの開発を行う。平成 22 年度の課題としてあげられた、研削材の使用量の調整や、切断面の粗さに繋がる脈動の抑制、切断速度の向上、圧力上昇までの時間の低減など更なる改良を検討する。

1. 1 装置開発

（1）開発概要

鋳物製造工程の後処理工程には、

- ① 砂落とし作業に、研削材を用いたショットブラスト処理
- ② バリ取りに、手作業グラインダー作業
- ③ 湯口、押湯部の切断に、大型カッターによるグラインダー作業等の作業がある。

湯口切断、押湯切断、バリ取り作業を行う場合、ショットブラストによる粉塵の発生、大型グラインダーを使用する重筋作業などの劣悪作業となる。これらの作業改善、安全性、作業効率向上をはかるため、上記作業を連続動作にて作業条件に適した超高压噴水を迅速に変更できるウォータージェット装置が必要である。今回低負荷環境型バリ取り装置の開発にウォータージェットを適用するにあたり、上記作業に適した超高压水噴流ウォータージェットを開発した。

（2）従来技術

従来の油圧ユニットを用いた高压発生装置は、Fig. 1 に示すように、油圧ポンプにて発生させた油圧をシリンダー比にて増圧させ、油圧装置のソレノイドバルブ切り替えによりプランジャーを往復運動させ高压水を発生させている。油圧方式によるウォータージェット噴水量、圧力コントロールを行う場合、油圧一次圧力の設定変更、リリースバルブの設定変更に複雑な油圧制御回路が必要となり、応答性も遅くなる。また、プランジャー内に油圧が進入しウォータージェット高压水に混入し、油

汚染の原因となる。

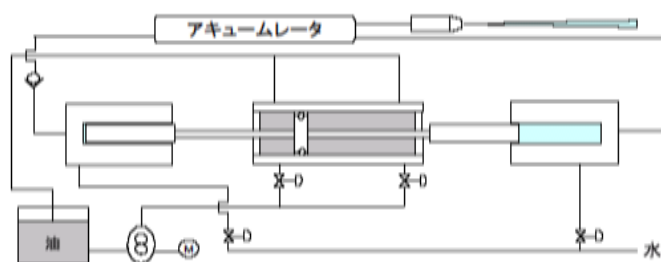


Fig. 1 従来の油圧式ウォータージェット装置概念図

(3) 大型鋳物用ウォータージェット装置

①増圧機構の開発

- ①-1 今回サーボモータとボールネジの組み合わせにより、モータ回転運動をボールネジにより直線運動に変換、プランジャーを駆動し、超高压水を発生させるメカ駆動増圧機構を開発し、その概略図を Fig. 2 に示す。

超高压水発生中プランジャーに作用する力を常に監視、制御系にフィードバック可能にする荷重センサマウント方式増圧機スライダーの開発を行った。本方式により高精度の超高压の圧力制御が可能となる他、超高压発生中においても任意の圧力制御が可能となる。

①-2 プランジャー駆動機構の開発

モータによる回転運動を直線運動に変換するボールネジ駆動部を、単一駆動方式にすることにより、駆動部の簡素化、応答性の遅れを解消した。

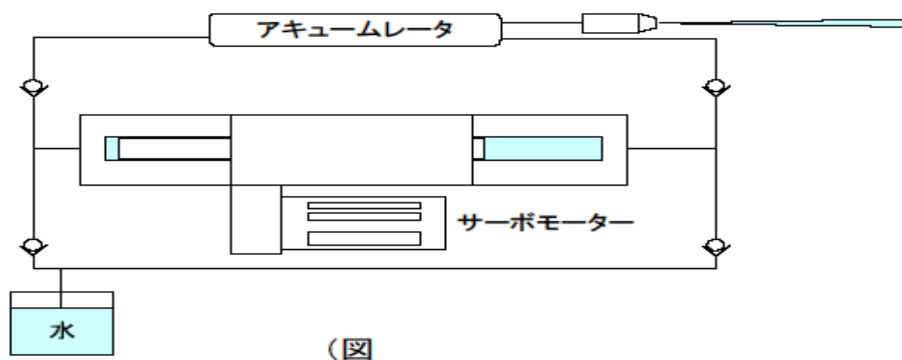


Fig. 2 サーボモータ駆動による機械式ウォータージェット装置概念図

②制御系の開発

- ②-1 高圧配管部に圧力センサーを組み込み、超高压水発生中の圧力を常に監視し、制御系にフィードバックし、圧力が常に一定になるようプランジャー速度をコントロールする圧力一定制御システムを開発搭載した。
- ②-2 常に運転状態を監視できるよう、圧力設定、異常監視パラメータの設定が、簡単に行えるタッチパネル操作方式を採用した。

③ウォータージェットバリ取り装置、装置仕様

③-1 ウォータージェット発生装置

1) 常用吐出最高圧力	300Mpa
2) 最大吐出流量	4L / min
3) 駆動機構	サーボモータによるボールネジ駆動方式
4) モータ容量	37 Kw
5) プランジャー数	2 ケ
6) 機器構成	
①プランジャー	2 ケ
②プランジャー駆動機構	1 式
③アッキュームレータ	1 ケ
④高圧配管	1 式
⑤砥粒タンク	1 台
⑥給水ユニット	1 式
⑦ウォータージェットノズル	1 式
⑧カバー	1 式
⑨超高压ホース	1 本 (10m)
⑩試運転砥粒	4 袋 (#80 25Kg 入り)

③-2 ウォータージェット制御盤 1 台

③-3 ノズル位置制御ロボット 1 台

1) 動作形態	垂直多関節型
2) 自由度	6 軸
3) 可搬重量	20Kg
4) 動作	
① 旋回	±180°
② 下腕	+155°、-110°
③ 上腕	+255°、-165°
④ 手首旋回	±200°
⑤ 手首振り	+230°、-50°
⑥ 手首回転	±360°

- | | | |
|-----|-------------|-----|
| ③-4 | ロボット制御盤 | 1 台 |
| ③-5 | ロボット先端倣い装置 | 1 式 |
| ③-6 | その他ユーティリティー | |
| 1) | 高圧ホーススタンド | 1 式 |
| 2) | ワーク架台 | 1 式 |
| 3) | 防水カバー | 1 式 |
| 4) | ロボット安全柵 | 1 式 |



Fig. 3 ウォータージェット発生装置



Fig. 4 ロボット先端倣い装置部



Fig. 5 装置全体

(4) 小型鋳物用ウォータージェット装置

平成 22 年度に試作したウォータージェット切断装置は、従来のウォータージェット切断機と比較して、加圧機構をサーボモーター＋ボールネジとしており、水圧の制御が容易であるものであり、目的である、セキ、湯口の切断が可能であることが判明した。しかし、ダブルシリンダーであるため本体が大型化しており、設置場所が限定されてしまうなどの課題点があった。

そこで平成 23 年度では、シングルシリンダー化した小型化ウォータージェットの開発を行った。

①ウォータージェット切断装置の変更点

①-1 小型化

省スペース化を図るため、ウォータージェット本体は増圧シリンダーが一つの単シリンダー機構とした。

22 年度製作の 2 シリンダーウォータージェットと、今回製作した単シリンダーウォータージェットの概念図を Fig.6 に示す。

①-2 圧力変動の抑制

アキュムレーター容量を増やすことで圧力変動を抑え、高圧水の脈動を緩和した。

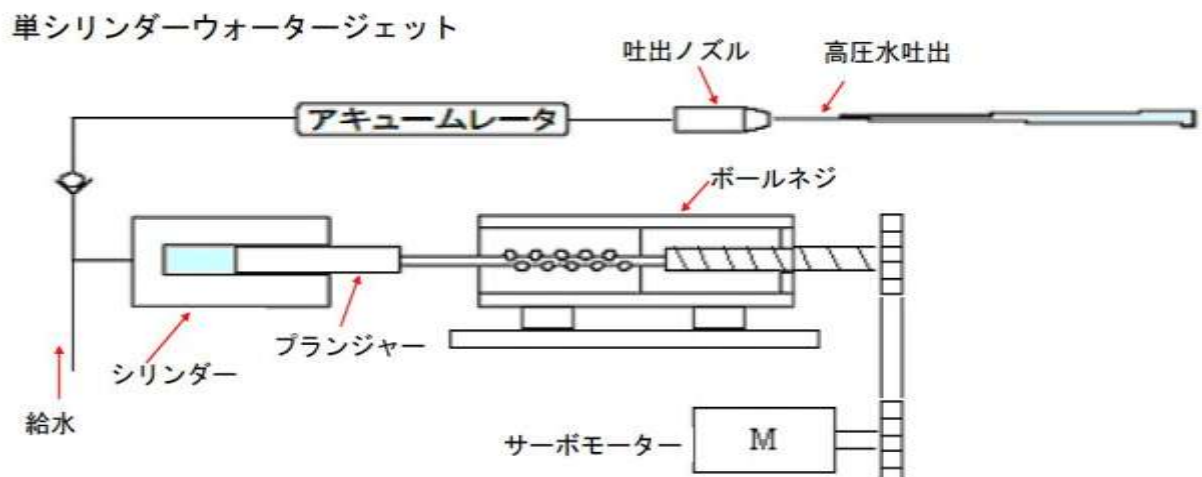


Fig.6 サーボモータ駆動による単シリンダーウォータージェット装置概念図

②高圧水吐出ノズル

今回のデフケースバリ取りに適用するため、ノズルの先端形状を新規開発した。高圧水吐出部の先端径が、従来・・・φ 20mm から、今回・・・φ 6mm と細くなり、ワークへの接近が容易になり、高精度の位置決め、バリ取り動作が可能となった。

③制御系

③-1 高圧配管部に圧力センサーを組み込み、超高圧水発生中の圧力を常に監視、制御系にフィードバックし、圧力が常に一定になるようプランジャー速度をコントロールする圧力一定制御システムを開発搭載した。

③-2 常に運転状態を監視できるよう、圧力設定、異常監視パラメータの設定が、簡単に行えるタッチパネル操作方式を採用した。

④小型ウォータージェットバリ取り装置、装置仕様

④-1 ウォータージェット発生装置

1) 常用吐出最高圧力	300Mpa
2) 吐出流量	圧力 300MPa 時 : 2 L/min 圧力 150MPa 時 : 3 L / min
3) 駆動機構	サーボモータによるボールネジ駆動方式
4) モータ容量	37 kW
5) プランジャー数	1 ケ
6) 機器構成	
① プランジャー	1 ケ
②プランジャー駆動機構	1 式
③アキュムレータ	1 ケ
④高圧配管	1 式
⑤砥粒タンク	1 台
⑥給水ユニット	1 式
⑦ウォータージェットノズル	1 式
⑧カバー	1 式
⑨超高圧ホース	1 本 (10m)

④-2 ウォータージェット制御盤 1 台

④-3 ノズル位置制御ロボット 1 台

1) 動作形態	垂直多関節型
2) 自由度	6 軸
3) 可搬重量	10kg

4) 動作

① 旋回	$\pm 170^{\circ}$
② 下腕	$+133^{\circ}$ 、 -110°
③ 上腕	$+165^{\circ}$ 、 -165°
④ 手首旋回	$\pm 180^{\circ}$
⑤ 手首振り	$+225^{\circ}$ 、 -50°
⑥ 手首回転	$\pm 360^{\circ}$

④-4 ロボット制御盤

1 台



Fig. 7 装置全体



Fig. 8 高圧水吐出ノズル

(5) ワーク専用治具の開発（平成 23 年度実施）

鋳造物（ワーク）には、寸法公差があり仕上がり製品に個体差がある。そのため、従来の固定治具によるバリ取りを行うと、寸法変化、製品損傷などの恐れがある。ウォータージェット（WJ）バリ取り装置のアームの可動範囲外となる部分について切断を行うための専用治具の開発を行った。

①ワークテーブルの開発

①-1 バリ取り用ワークテーブル

デフケースのバリ取りのため、サーボモータ駆動による回転テーブル及び治具を設けた。ワークをテーブルにセットし、回転テーブル制御盤からの指令にてワーク固定のエアシリンダー動作及び、ロボットのバリ取動作に連動してのテーブル回転を行う。

①-2 カバー及び集塵機構

ロボット及び回転テーブルはワーク架台内部に設置、架台上部は全閉カバーにて覆い、外部への騒音を抑える構造とした。また、ミストコレクターを設置し、発生したミスト及び粉塵をカバー上部より収集する。

①-3 切削液の再利用

ウォータージェットで使用する流体には、ワークの防錆のために水に切削油を希釈して使用している。切削液の再利用及び使用した吐粒の回収のため、ワークテーブルの横に分離槽を設けて吐粒を分離し、循環ポンプにて切削液のみを回収、濾過フィルターを通して再利用する。

②制御系

- ②-1 ワークテーブルの制御盤を設け、ワークテーブル関連の機器、回転テーブルの動作及びパラメータ設定、ワーク固定エアシリンダー動作、切削液循環ポンプの動作を単独で行えるようにした。

また、ロボットの制御盤との信号受け渡しを行い、ロボットのバリ取り動作に連動してテーブル回転動作を自動実行する構成とした。

- ②-1 ワークテーブル側面に操作盤を設け、機側からウォータージェットの運転停止及び、バリ取り操作を開始出来るようにした。これにより、ウォータージェット及びロボットの立上げ準備完了後は機側の操作盤のみでバリ取り動作が実行可能とした。

②-3 対象ワークのバリ取り作業を連続動作にて行う場合、高圧水噴流ノズルの位置制御を行う必要がある。今回は対象ワークをデフケースに限定し、ワークは治具にて位置決めし、その位置でティーチング操作を行い、ロボット動作プログラムを作成する。その後は治具により毎回同じ位置にワークが固定出来るため、都度のティーチング操作は不要とした。

③ウォータージェットバリ取り装置、装置仕様

③-1	バリ取り作業用ワークテーブル	1 式
1)	ワーク架台	1 式
2)	ワーク回転テーブル及び位置決め治具	1 式
3)	砥粒分離槽	1 式
4)	ミストコレクター	1 台



Fig. 9 ワークテーブル全体

(6) ウォータージェット切断機改修

大型鋳物の堰、湯口部などは 50mm 以上の肉厚となり、これまでのウォータージェット切断装置では、切断速度が遅く、作業効率が低下する。そのため、切断速度を向上させる目的で、ウォータージェット切断機の改修及び、条件の変更を行った。

①ウォータージェット切断機改修および動作条件変更点

①-1 ウォータージェット切断機 動作条件

(1) ウォータージェット機動作のサイクルタイムの短縮による吐出流量の増加。

(2) 砥粒引き込み方法の変更

現状の砥粒引き込み量調整は、エアーコンプレッサーから送る空気で砥粒タンクから引き揚げる砥粒量を調整し、その砥粒を高圧水吐出部で発生した負圧で吸い込む、という形式であった。(Fig.10)

この方法では、一次側のエジェクターで発生する負圧は最小で -0.5kg/cm^2 であり、砥粒の引き揚げ量は、砥粒サイズ #80 で最大 200g/min であった。そこで砥粒量を増やすため、一次側の流量調整部分を廃し、高圧ノズル側のみで引き込み量を調整する方式に変更した。(Fig.11)

高圧ノズルで発生する負圧は最小 -0.9 kg/cm^2 (Fig38)、引き上げ量は砥粒サイズ #80 で、 700g/min となった。

砥粒量の調整は、配管途中の流量調整弁にて負圧をコントロールして行う。また、砥粒サイズ #36 を使用する際は、先端での砥粒詰まりを防ぐため、先端の整流ノズルは内径を $\phi 1.0$ から $\phi 2.0$ に広げたものを使用した。

①-2 ウォータージェット切断機改修による切断結果

(1) 高圧水吐出流量増加

- ・ 従来 1.2 l/min
- ・ 変更後 2.2 l/min

(2) 砥粒量増加および、粒径の変更

- ・ 従来 使用砥粒：ガーネット #80(粒径 $\phi 0.3\text{ mm}$)
 砥粒供給量：MAX 200g/min
- ・ 変更後 1)使用砥粒：ガーネット #80
 砥粒量：MAX 700g/min
 2)使用砥粒：ガーネット #36 (粒径 $\phi 0.6\text{ mm}$)
 砥粒量：MAX 600g/min

3) 使用砥粒：廃砂（粒径 $\phi 0.15 \sim 0.3 \text{ mm}$ ）

砥粒量：MAX 700g/min

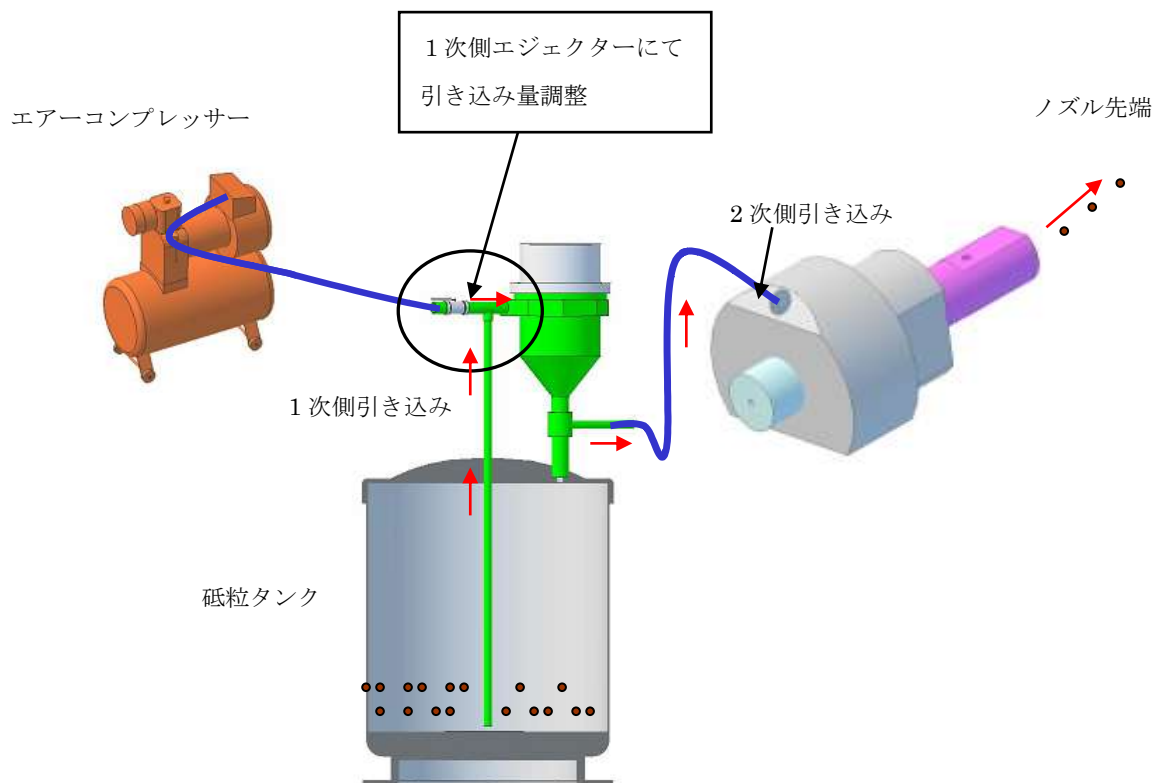


Fig.10 従来の砥粒引き上げ方法

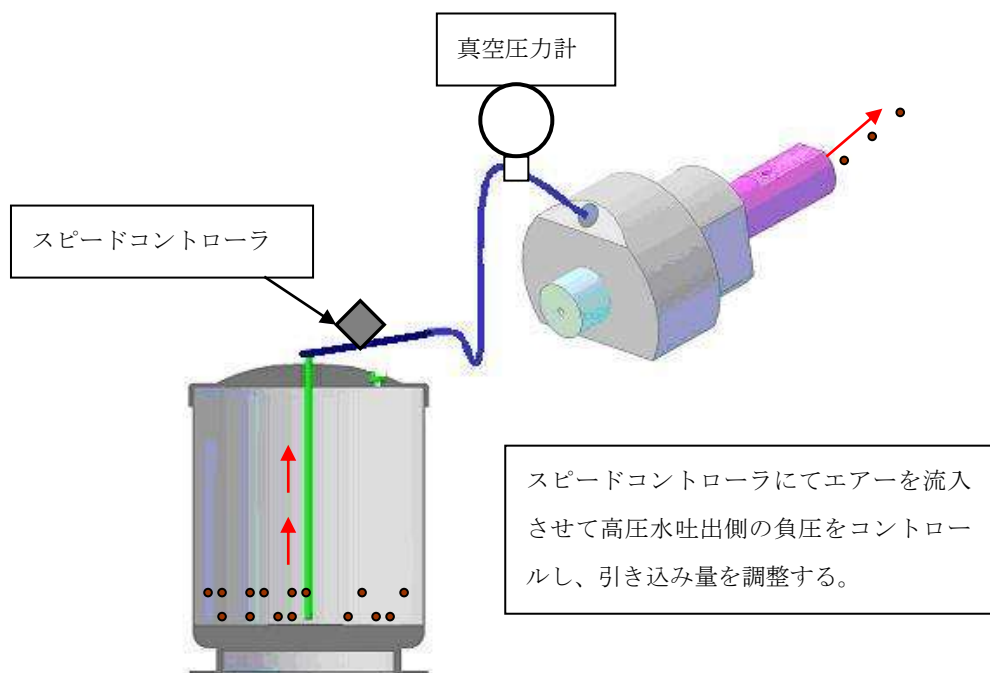


Fig.11 砥粒引き上げ方法変更後



Fig.12 高圧水吐出側の最小負圧 -0.09MPa



配管を分岐させ、スピードコントロールバルブを追加した。
エアーを流入させることで負圧をコントロールする。

Fig.13 流量調整

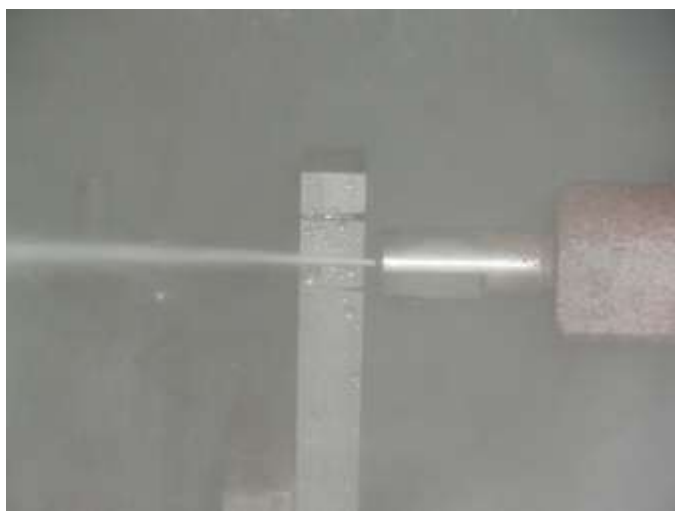


Fig.14 高圧水吐出

（７）騒音低減化対策

水圧の上昇に伴い発生するウォータージェット装置本体からの騒音および、切断部から発生する騒音の低減化について本体内部における防音、吸音材設置などの措置や、作業環境から WJ 本体の据付場所の隔離、切断部の騒音に対しては、防護柵など作業者および周辺環境改善へ向けての検討を行った。

①騒音対策方法

小型鋳物用ウォータージェット切断装置のウォータージェット切断時に発生する騒音を防止するため、騒音の発生源となる切断部（ノズル制御部およびワーク回転台）を囲い、操作に必要な開口、メンテナンス用の扉を設置、排気ダクトを設けることによる騒音対策を行った。

②騒音対策結果

ワーク及び切断部を囲う事によって、騒音の発生は抑制された。



Fig.15 騒音対策を施したワークテーブル

1. 2 各種試験の結果

(1) 板厚に対する貫通・切断速度試験

①板厚に対する貫通速度試験

吐出圧力： 150、 300MPa
 吐出量： 2.8～3.0L/min
 研削材吐出量： 200g/min（ガーネット）
 対象までの距離： ノズル先端部から 1mm
 板厚： 5mm、10mm、15mm、20mm、30mm

Table 1 板厚に対する貫通速度

	5mm	10mm	15mm	20mm	30mm
150MPa	9.3	28.0	50.7	84.0	167.7
300MPa	7.3	19.0	30.3	58.7	111.7

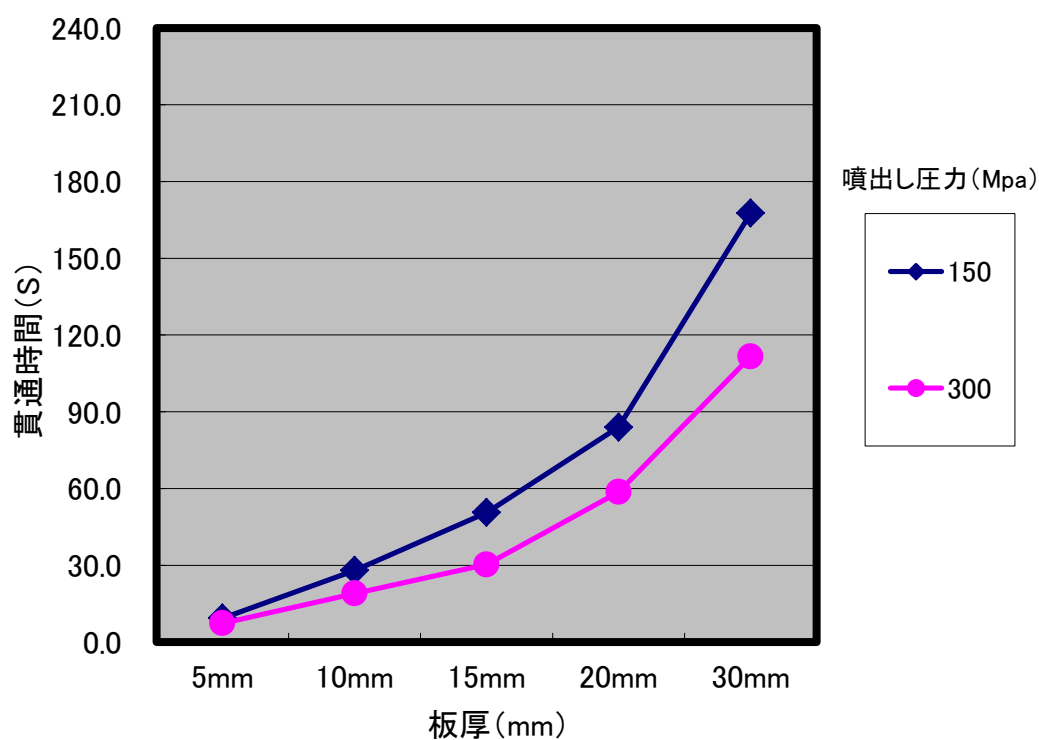


Fig. 16 板厚および圧力に対する貫通速度

②板厚に対する切断速度試験

吐出圧力： 150、300MPa
 吐出量： 2.8～3.0L/min
 研削材吐出量： 200g/min（ガーネット）
 対象までの距離： ノズル先端部から 1mm
 板厚： 5mm、10mm、15mm、20mm、30mm

Table 2 板厚に対する切断速度試験

	10mm	15mm	20mm	25mm	30mm
150MPa	24	20	14	11	7
300MPa	28	21	19	14	9

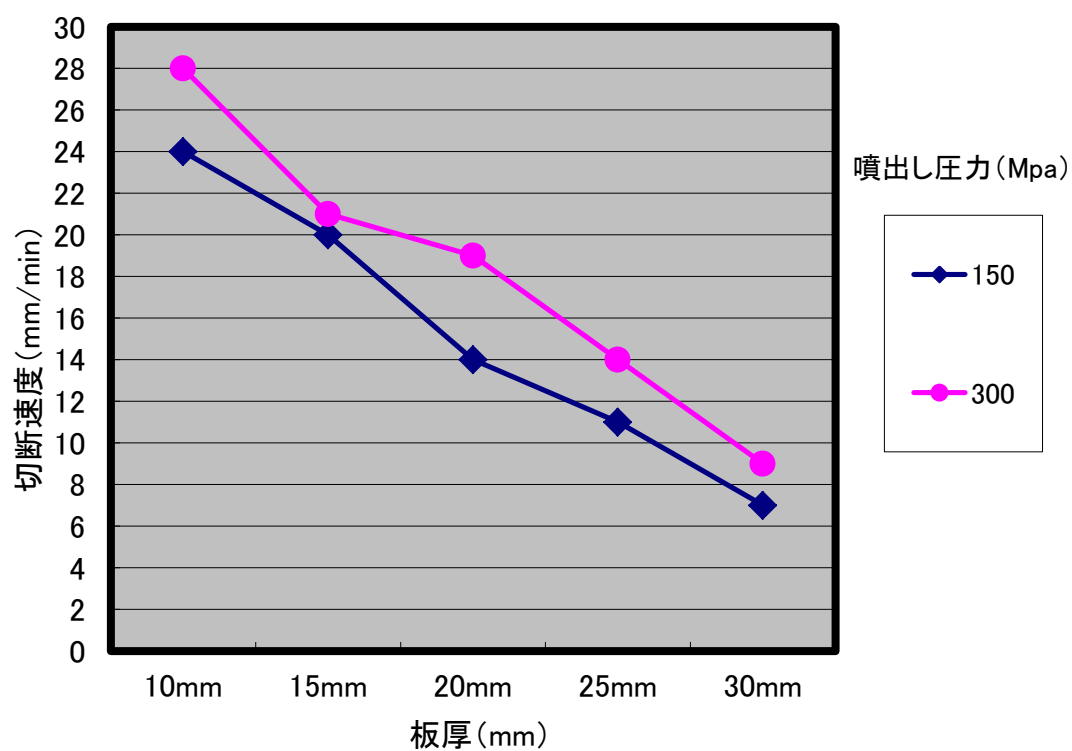


Fig. 17 板厚および圧力に対する切断速度

③結果

板厚が 5～10mm 程度の時は、噴出し圧力の差で、貫通時間にあまり大差はないが、15mm 以上になってくると板厚が上昇するにつれ、噴出し圧力で、貫通時間に差が出た。

この理由として、Fig. 18 が示すように、板厚が上昇すると、その板厚の分だけ対象物との距離も離れる為、切断速度が低下するということが考えられる。（対象物との距離は近いほど貫通時間が減少する）

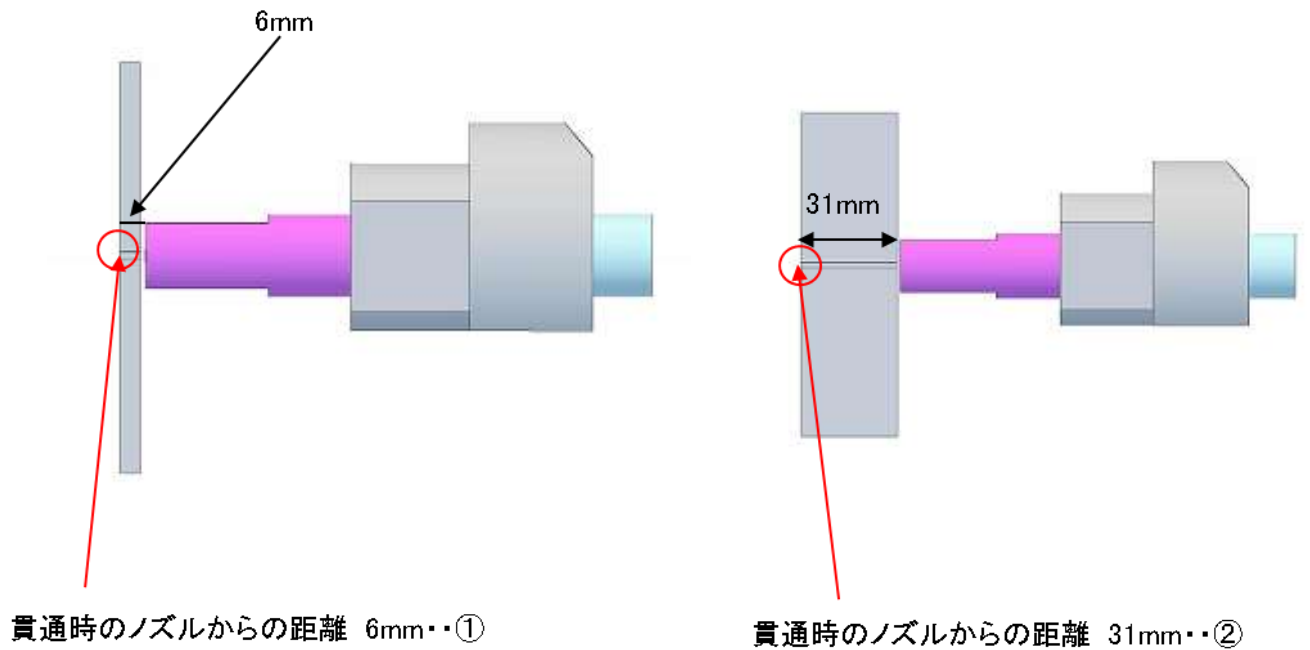


Fig.18 切断対象の厚さとノズル距離の関係

(2) 高圧水の流量増加による切断速度試験

切断速度向上を目的とし、高圧水吐出量を増加させ、切断速度試験を行った。

①流量条件の変更

従来 高圧水吐出量 : 1.2 l/min

変更後 吐出量 : 2.2 l/min

②その他試験条件

高圧水吐出圧力 : 300MPa

使用砥粒 : ガーネット #80

砥粒量 : 200 g/min

③切断試験結果

流量増加により、切断速度が 1.2～1.3 倍の増加となった。試験結果を Fig.19 に示し、切断部の形状を Fig.20 に示す。

板厚 (mm)	切断速度 (mm/min)	
	流量 (1.2 l/min)	流量 (2.2 l/min)
10	28	35
20	19	22
30	8	11

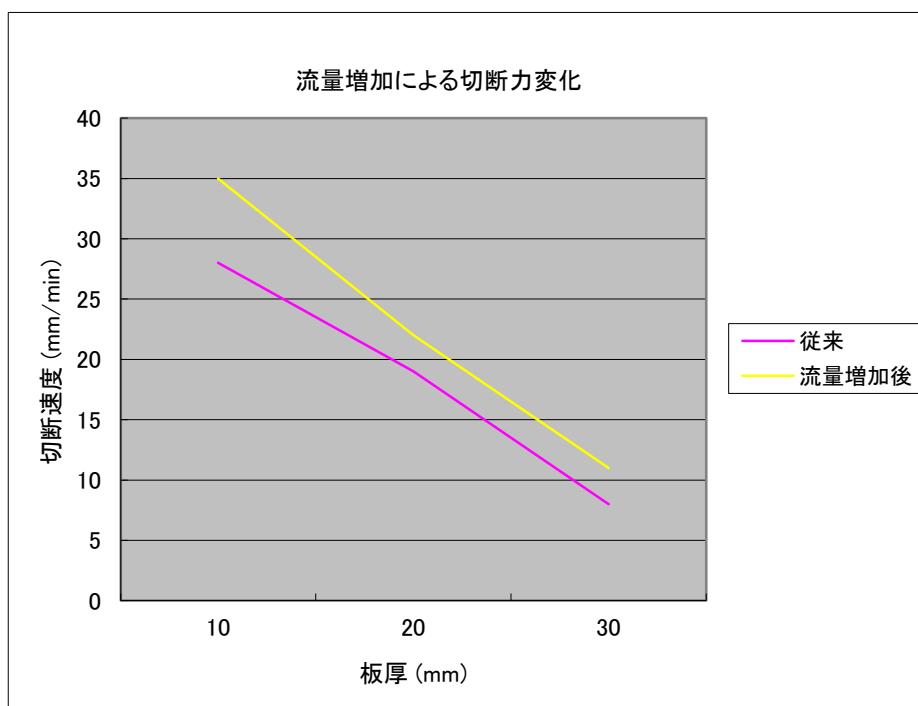


Fig.19 流量増加による切断力比較



Fig.20 切断部拡大

(3) 砥粒量及び砥粒変更による切断速度試験

砥粒引き込み方法の変更および吐出部の整流ノズル内径を広げることにより粒径の大きい砥粒を使用可能とし、砥粒の量を従来の最大 400g から 700g へ増加させた切断速度試験を行った。

①ウォータージェット機動作条件

高压水圧力 300MPa

高压水吐出流量 2.2 l/min

②その他試験条件

使用砥粒

1) ガーネット #80 粒径 $\phi 0.3\text{mm}$

2) ガーネット #36 粒径 $\phi 0.6\text{mm}$

3) 廃砂 (鋳物砂) 粒径 $\phi 0.15 \sim 0.3\text{mm}$

切断物 材質: SS400

高压水吐出部から切断物までの距離: 2mm

③試験方法

切断物を等速 50mm/min にて移動させ、それぞれ上記(2)の砥粒について砥粒量を変化させ、各条件での切断厚さの比較を行った。

④試験結果

以下に、切断速度 50 mm/min での切断可能厚さを示す。

Fig.21～23 に砥粒毎の試験結果を、また Fig.24 に比較を示す。

④-1 ガーネット #80

粒径 (φ0.3 mm)

切断速度 50 mm/min

砥粒量(g)	切断厚さ(mm)
100	5
200	7
300	8
400	9
500	11
600	12
700	13

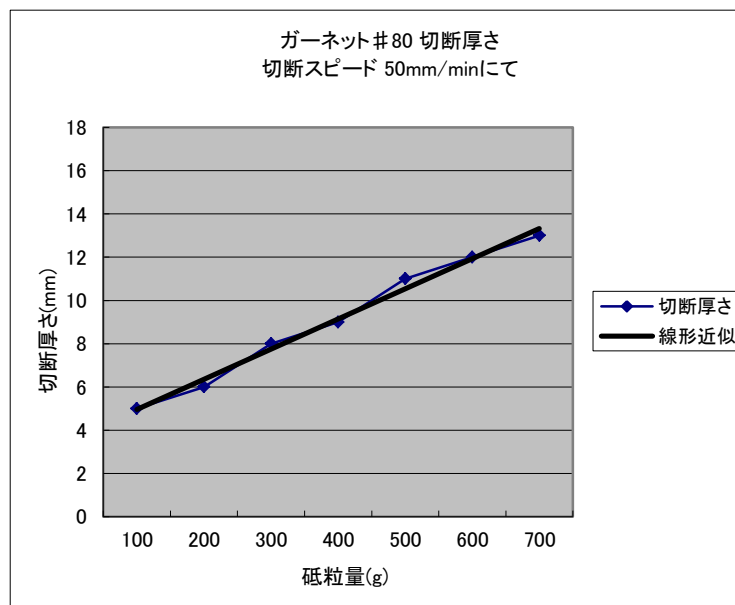


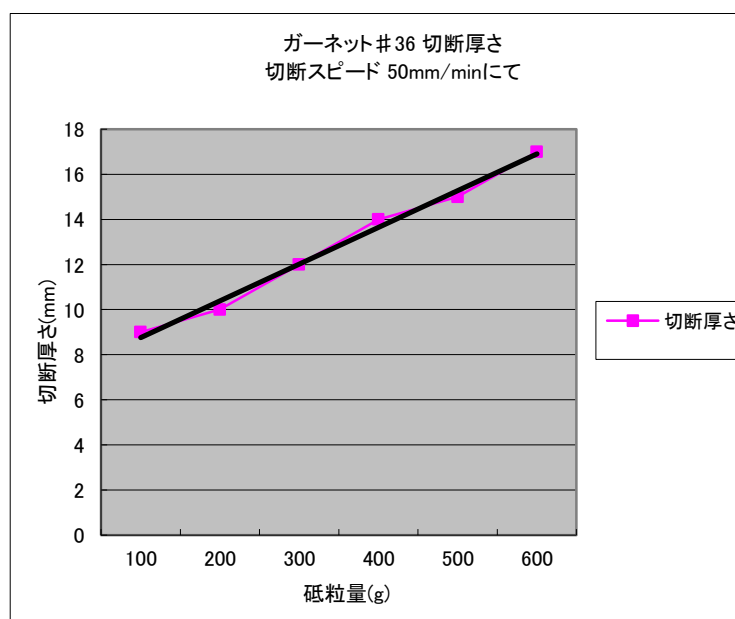
Fig.21 ガーネット #80 による切断力

④-2 ガーネット #36

粒径 (φ0.6 mm)

切断速度 50 mm/min

砥粒量(g)	切断厚さ(mm)
100	9
200	10
300	12
400	14
500	15
600	17
700	-



※ 引込可能量 最大 600g/min

Fig.22 ガーネット #36 による切断力

④-3 廃砂（鋳物砂）

粒径 $\phi 0.15 \sim 0.3\text{mm}$

切断速度 50 mm/min

砥粒量(g)	切断厚さ(mm)
100	3
200	4
300	5
400	6
500	7
600	9
700	10

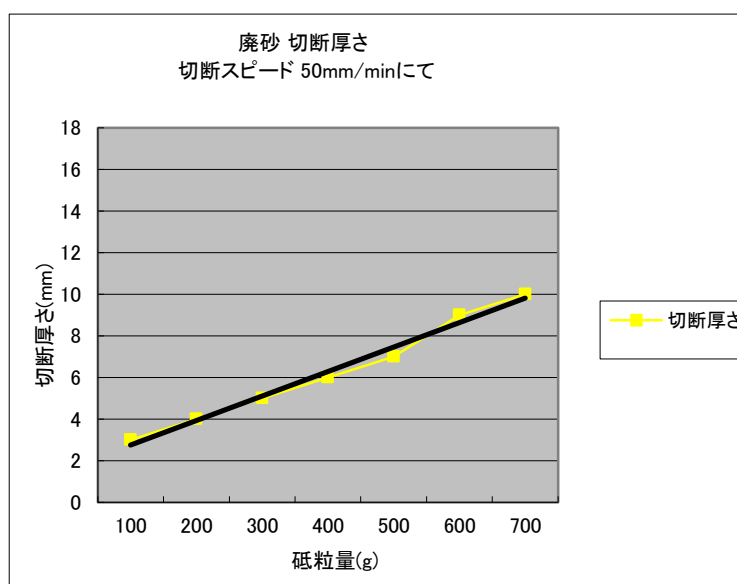


Fig.23 廃砂による切断力

④-4 砥粒毎の切断力比較

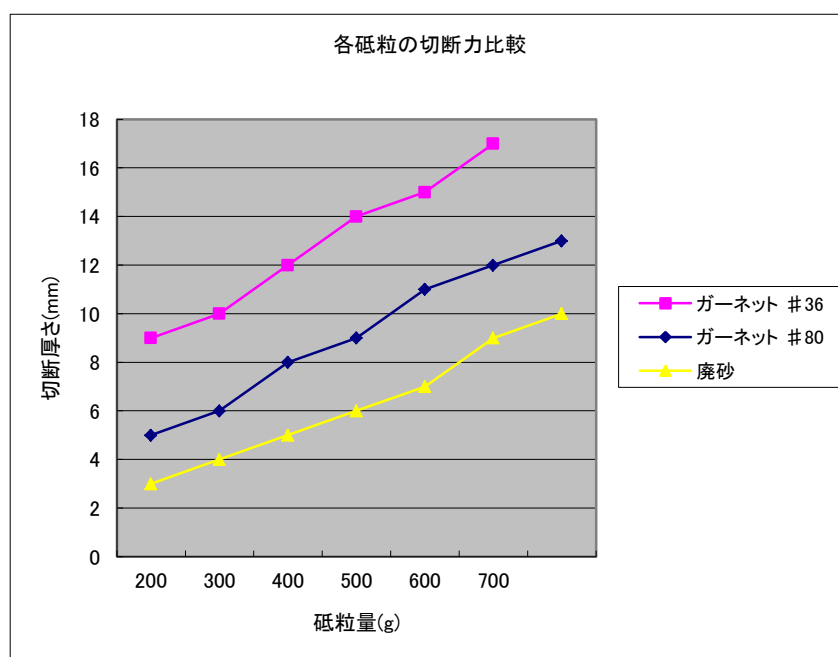


Fig.24 各種砥粒による切断力比較

④-5 試験結果

- ・砥粒径が大きい程、切断力が高くなる。
- ・ガーネット#80 (粒径 $\phi 0.3\text{mm}$) と、ガーネット#36 (粒径 $\phi 0.6\text{mm}$) との比較で切断力は 1.5 倍となった。
- ・砥粒量増加による切断力はほぼ比例的に増加する。
- ・また、吐出部の整流ノズル径を $\phi 1.0\text{mm}$ から $\phi 2.0\text{mm}$ へ広げているため、切断幅も広くなる。(Fig.25)

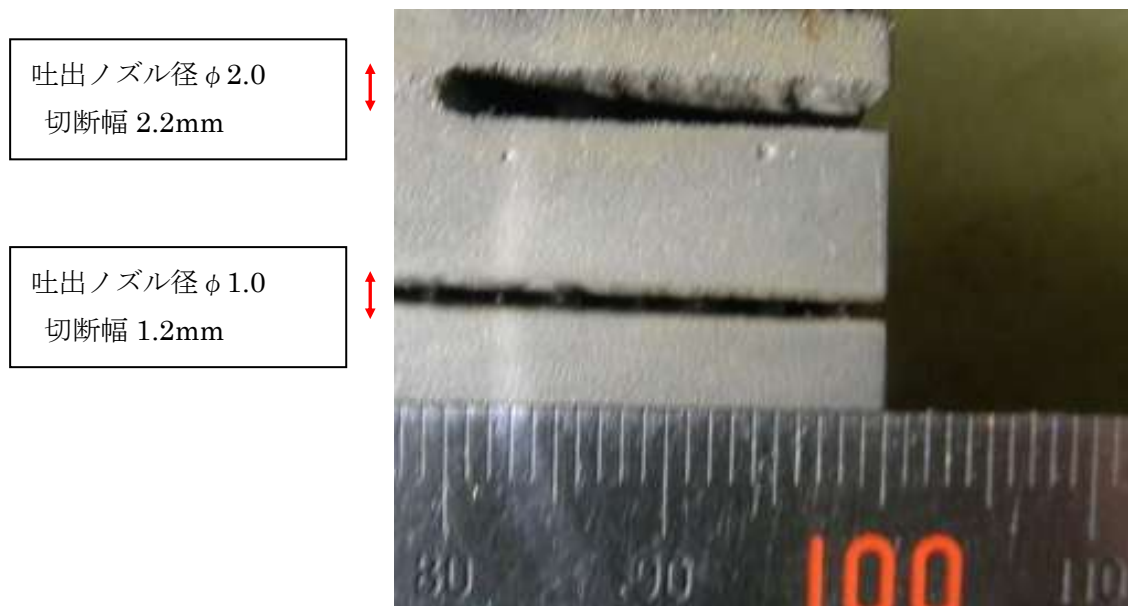


Fig.25 吐出部ノズル径による切断幅比較

⑤断力向上のテスト結果まとめ

切断速度 50mm/min での最大切断厚さを従来の条件と、改造後の条件とで比較する。

	従来	変更後
高圧水吐出圧力	300 MPa	300 MPa
高圧水流量	1.2 l/min	2.2 l/min
使用砥粒径	0.3 mm	0.6 mm
砥粒量	200 g/min	600g/min
切断速度 50mm/min での 切断可能厚さ	4.5 mm/min	17 mm/min

上記より、高圧水吐出量増加、砥粒最大量増加、砥粒径増により切断力が約 4 倍に向上した。

1. 3 ウォータージェット装置 ワーク切断テスト

ウォータージェット切断装置にて行った切断試験結果を以下に示す。

(1) 切断テスト1

写真を Fig. 26 から Fig. 29 に示す。

①対象ワーク...

湯口

材質 . . . FCD
切断部形状 . . . t 29 × 110mm
切断スピード . . . 18 mm/min

切断結果 . . . 良好

②ウォータージェット条件

- ・ 高圧水吐出圧力 . . . 300MPa
- ・ 高圧水吐出流量 . . . 3.0 l/min
- ・ 供給砥粒 . . . ガーネット #80
- ・ 供給砥粒量 . . . 100 g/min



Fig. 26 ロボット先端



Fig. 27 高圧水吐出, 切断



Fig. 28 切断面



Fig. 29 切断面拡大

(2) 切断テスト2

写真を Fig. 30 から Fig. 33 に示す。

①対象ワーク...

半円型鋳物

材質	・・・	FCD
切断部形状	・・・	t 12.5 × 40mm
切断スピード	・・・	18 mm/min

切断結果・・・ 良好

②ウォータージェット条件

・ 高圧水吐出圧力	・・・	300MPa
・ 高圧水吐出流量	・・・	3.0 l/min
・ 供給砥粒	・・・	ガーネット #80
・ 供給砥粒量	・・・	100 g/min

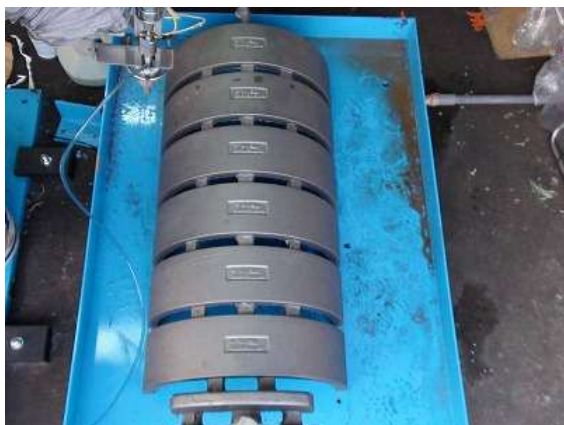


Fig. 30 ワーク写真 半円型鋳物



Fig. 31 切断箇所



Fig. 32 高圧水吐出, 切断



Fig. 33 切断部 拡大

(3) 切断テスト3

写真を Fig. 34 から Fig. 37 に示す。

①対象ワーク...	湯口	
材質	・・・	高クロム鋳鉄
切断部形状	・・・	φ88 mm
切断スピード	・・・	6 mm/min

切断結果・・・ 切断可能

②ウォータージェット条件

・ 高圧水吐出圧力	・・・	300MPa
・ 高圧水吐出流量	・・・	3.0 l/min
・ 供給砥粒	・・・	ガーネット #80
・ 供給砥粒量	・・・	100 g/min



Fig. 34 高クロム鋳鉄 湯口切断



Fig. 35 高圧水吐出, 切断



Fig. 36 切断部 拡大



Fig. 37 切断面

(4) 切断テスト4

開発したウォータージェット切断装置を、実施場所である(株)村瀬鉄工所函館本社に移設後、関係者を集めて切断試験を行った。

日付：平成 23 年 2 月 22 日（火）

場所：株式会社村瀬鉄工所 函館本社

立会い人：(株)テラマチ、(株)21総研、(株)村瀬鉄工所、佐藤鋳鋼(株)、室蘭工業大学

写真を Fig. 38 から Fig.39 に示す。

①対象ワーク...	湯口	
	材質	・・・ FCD
	切断部形状	・・・ t 29 × 110mm
	切断スピード	・・・ 18 mm/min
	切断結果・・・	切断可能
②ウォータージェット条件		
	・ 高圧水吐出圧力	・・・ 300MPa
	・ 高圧水吐出流量	・・・ 4.0 l/min
	・ 供給砥粒	・・・ ガーネット #80
	・ 供給砥粒量	・・・ 100 g/min



Fig. 38 高圧水吐出 切断後



Fig. 39 切断ライン

③切断面の解析

マイクロスコープを用いて摩耗面を観察した。Fig. 40 に、摩耗面を摩耗表面の状況を、マイクロスコープにより 3 次元化した結果を示す。測定箇所は、ウォータージェット吐出部から、0mm、7mm、14mm、20mm、29mm の距離はなれた部分の測定を行った。

この図は、摩耗の凹凸を表しており、赤い部分が高く、青い部分は低いことを示している。断面高さプロファイルから吐出部に距離が近い部分では、最大高さが $59\mu\text{m}$ と表面凹凸は小さく、最も遠いワークの厚さ部分 29mm では、最大高さ $296\mu\text{m}$ となっており、ウォータージェットの切断出口部分において表面が粗くなることが判明した。

また、切断面においては、縞状のウォータージェットの痕が見える。これは、ウォータージェットに脈動が現れている証拠である。脈動が起こる原因としては、研削材（ガーネット）の移送がウォータージェットの勢いによる負圧輸送のため安定した供給ができず、Fig. 41 に示すようにプラグ流が発生し、その為脈動が発生したものである。そこで、ウォータージェットノズル先端に近い位置に研削材の供給位置を変更し、また研削材供給タンクを重力落下式などにすることによって、プラグ流を浮遊流とし研削材の安定供給を行う。

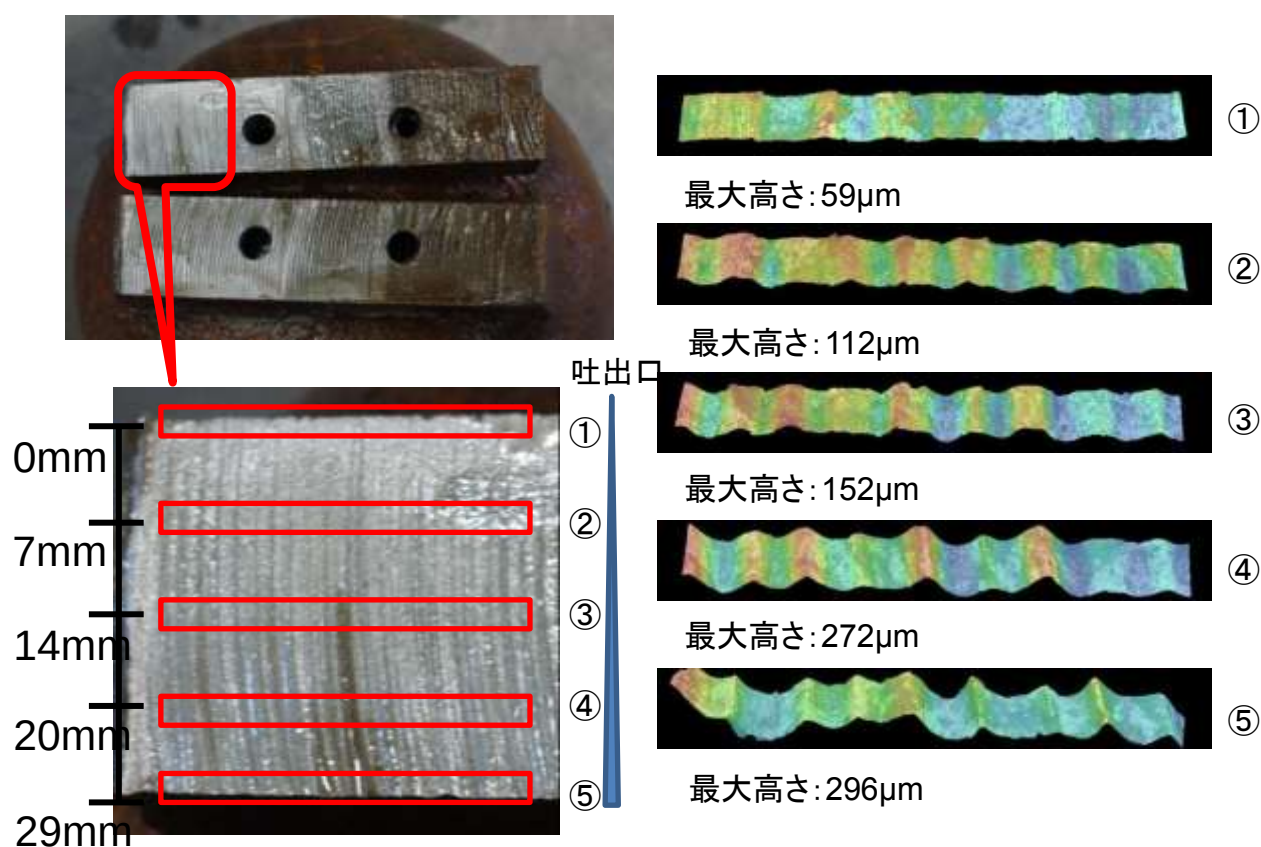
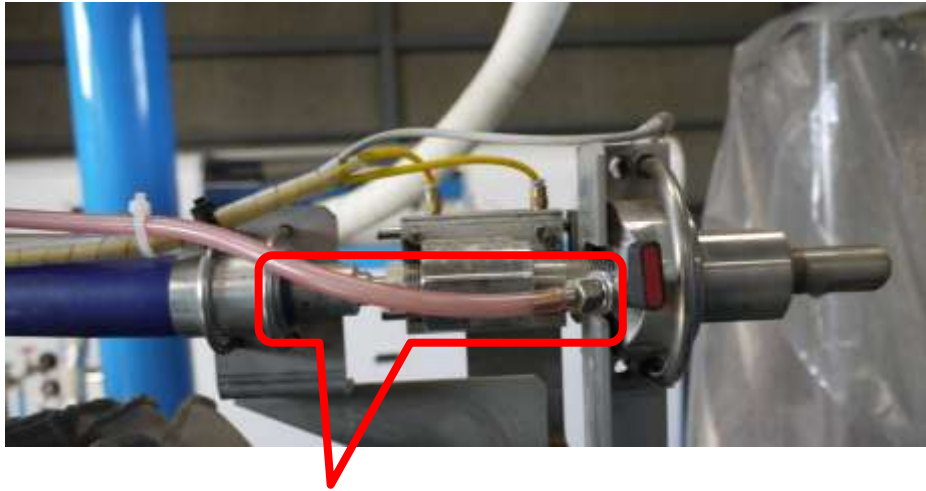


Fig. 40 マイクロスコープによる切断面の解析



プラグ流



プラグのような集団を形成しながら移動する流れ

Fig. 41 切断面の縞模様化に起因する研削材の供給（プラグ流）

2. 噴射ノズルの耐摩耗材料の開発

水が高压で挙動するノズル部分は、高压水によるエロージョン摩耗が発生しやすく低寿命となる。超合金製の高压水ノズルの場合は、寿命が約 1 時間と短い(ダイヤモンド製は、寿命が長いが価格が 10 倍となる)。今回開発するウォータージェット切断機の場合は、超高压水 (600MPa) を目指しており、今までの 400MPa に比べて、さらにノズルの消耗が激しくなる。

そこで、バナジウム (V)、クロム (Cr)、ニッケル (Ni) などの金属元素を調整・配合 (合金配合設計) し、硬質な炭化物が微細に、しかも粒状として基地組織中に分散した耐摩耗性材料の開発を行う。

開発に当たっては、摩耗寿命を 12 時間、価格を従来のダイヤモンドノズルの半値以下となる噴射ノズルの開発を目標として開発を行った。

2. 1 合金組成の選定

基本合金組成として、Cr、Mn、V、Ni を添加し、特に V 量を 10% とした白鑄鉄を選び、耐摩耗性に及ぼす影響を調査した。下記に開発材料の組織写真および、比較材として用いた炭素鋼、ステンレス鋼を示す。

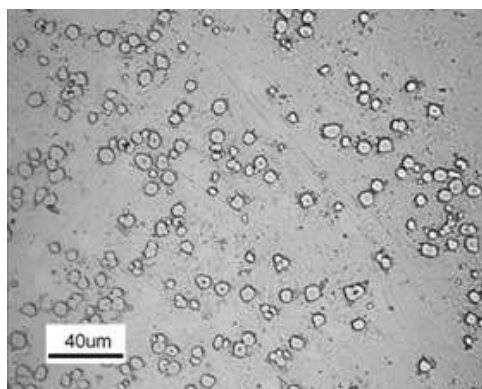


Fig. 42 耐摩耗材料 1

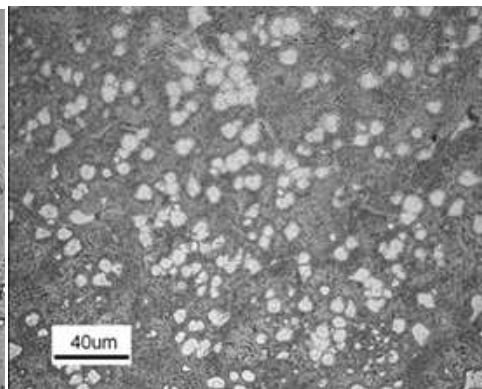


Fig. 43 耐摩耗材料 2

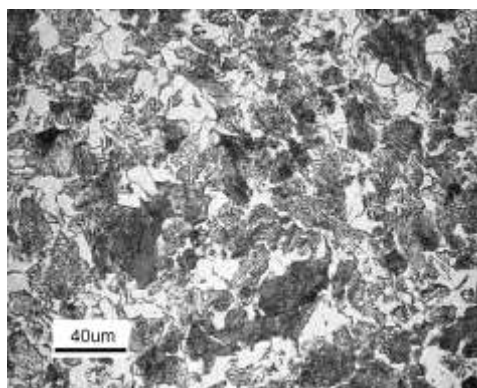


Fig. 44 炭素鋼

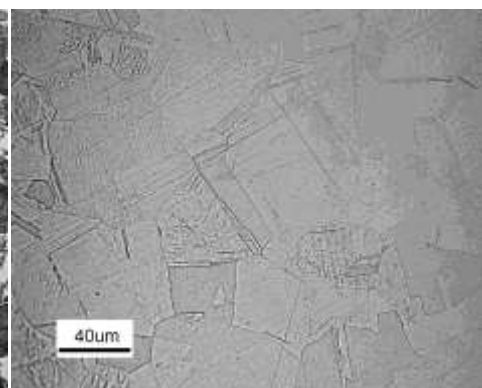


Fig. 45 ステンレス鋼

Table3 開発材および比較材の化学成分 (Mass%)

	C	Si	Mn	Cr	V	Ni	others	硬さ (HV)
耐摩耗材料 1	3.0	0.8	0.6	18	10	8	---	350
耐摩耗材料 2	3.0	0.6	12		10		P,S	480
炭素鋼	0.45	0.2	0.7	-	-	-	P,S	220
ステンレス鋼	0.06	0.5	1.5	18	-	8	-	150

2. 2 各種摩耗試験

(1) 常温エロージョン試験

常温エロージョン試験機は、吸引式ブラストマシンを用いた。試験機の構造を Fig.46 に示す。



Fig. 46 常温エロージョン摩耗試験機

①試験方法

試験条件は、試験片の寸法は $50 \times 50 \times 10$ mm、衝突粒子噴出ノズルから供試材表面までの距離を 50mm とした。衝突角度を変化させるため、角度を調整する治具を設置し、すべての供試片に対し、30deg.、60deg.及び 90deg.の 3 水準で試験した。空気流速は 100m/s、噴出量は 30 ± 1 g/sec、総循環粒子量は 2kg とした。実験時間は 3600s、室温で実験を行った。

用いた粉粒体を Fig. 47 に示す。粉粒体はランドカットワイヤー (RCW) を使用した。RCW は円形加工したワイヤーを一定長さで切断した円柱形の粒子で、RCW の硬度はビッカース硬さで 800Hv、平均粒径は $810 \mu\text{m}$ のものを使用した。粉粒体自体も、供試材への衝突によって摩耗、変形するため、試験毎に交換した。

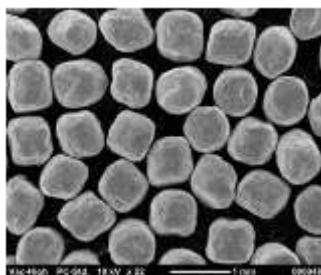


Fig. 47 ラウンドカットワイヤー

②試験結果

各供試材の室温エロージョン摩耗試験結果を Fig. 48 に示す。横軸に衝突角度、縦軸に損傷速度を示す。開発材においては、一般的に耐摩耗材として用いられる高クロム鋳鉄よりも摩耗量が少なく、優れた耐摩耗性を有していることが判明した。また、衝突角度 60deg.、30deg.および 90deg.においても摩耗量の差は見られず、衝突角度依存性が無い材料である。

耐摩耗材料 2 は、一般鋳鉄の 10 倍、高クロム鋳鉄の 5 倍の耐エロージョン摩耗性を有することが判明した。

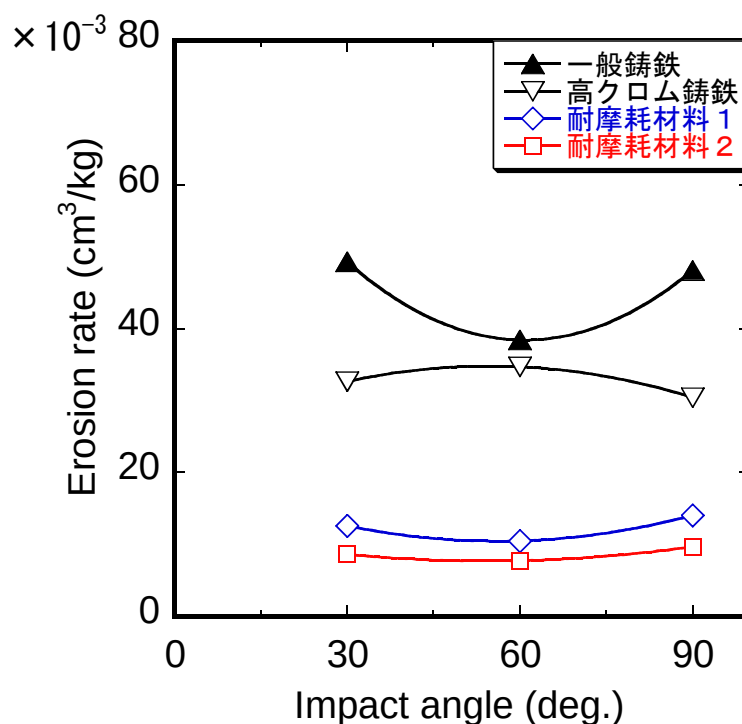


Fig. 48 常温エロージョン摩耗試験結果

(2) スガ式摩耗試験によるすべり摩耗特性評価

摩耗試験にはスガ式摩耗試験機（NUS-IS03）を用いた。Fig. 49 にスガ式摩耗試験機の写真を示す。試験荷重は 0.98N～29.4N まで広範囲変化でき、摩耗輪に自由にエメリー紙を取り付け、試料が 1 往復するたびに摩耗輪が 0.9 度回転し、1 回転（試料が 400 往復）するごとにエメリー紙を取り替え、試験片が常に新しいエメリー紙で摩耗される仕組みとなっている。さらに、本試験機は、試料面に対し下方から摩耗輪が接触する構造で、摩耗粉が試験面に残らず摩耗すべりは発生しにくい。また、抜群の再現性と直線性がある。



Fig.49 スガ式摩耗試験機

①試験方法

実験条件を Table 4 に示す。試験荷重は 19.6N とし、試験片の表面は、研削加工を行い、表面粗さを $Ra=0.2\mu m$ で統一した。往復速度は 1 分 40 回とし、総往復回数は、2000 回とした。供試材には、耐摩耗材料 1、耐摩耗性材料 2、比較材として一般鋳鉄およびステンレス鋼を用いた。

Table4 スガ式摩耗試験実験条件

試験片サイズ	50mm×50mm×4mm
試験荷重	0.98N～29.4N
試験片表面粗さ	研削加工 ($Ra=0.2\mu m$)
摩耗輪の研磨紙	#180
往復速度	1分40回
総往復回数	2000回

②試験結果

各試験片に対し、すべり摩耗試験を行った。実験結果を Fig. 50 に示す。このグラフからわかるように、炭素鋼の摩耗量は一番多く、その次にステンレス鋼、耐摩耗材料 1、耐摩耗材料 2 の順に摩耗量が減少しており、耐摩耗材料 2 が滑り摩耗においても優れた耐摩耗性を示した。

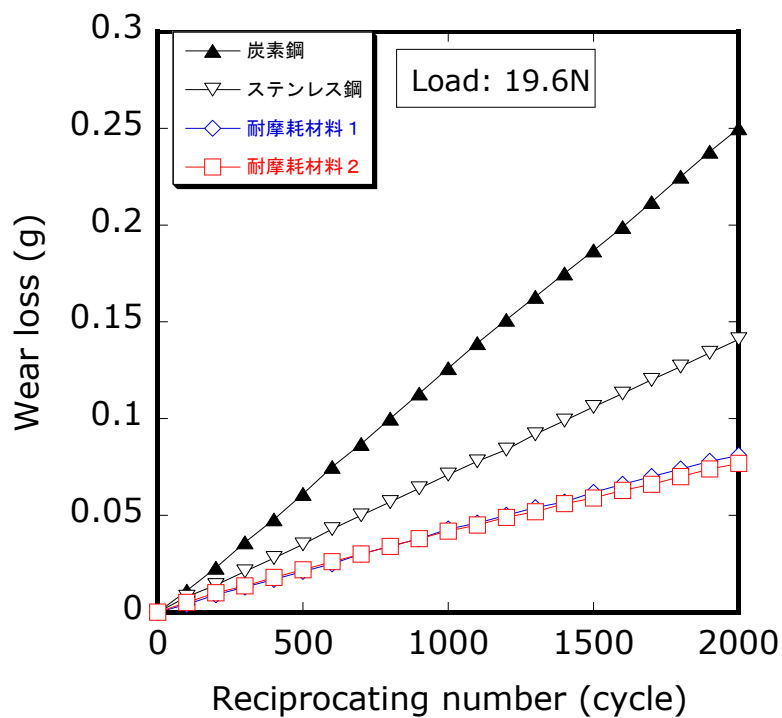


Fig.50 スガ式摩耗試験結果

③まとめ

ウォータージェット切断噴射ノズル用耐摩耗材料の開発を行った結果、耐摩耗材料 2 は、滑り摩耗においては従来品である炭素鋼と比較して 5 倍、エロージョン摩耗においては一般鋳鉄の 10 倍もの耐摩耗性を有することが判明した。

2. 3 開発材による噴射ノズルの開発

(1) 超高压水噴射ノズルの開発

高压水吐出部の組図を Fig.51 に示す。また、噴射ノズル部を拡大し、Fig.52 に示す。

(2) 耐摩耗性テスト結果

高压水噴射ノズルの材質は①SUS630、②超硬素材 FF20 合金、③超硬素材 BL105 合金、④開発材料、⑤ダイヤモンド にて製作し、ノズルの耐摩耗性テストを行った。また、ウォータージェット運転条件は、圧力 300MPa、流量 1.5 l/min とした。試験結果を Fig. 53 から Fig. 61 に示す。

また、各ノズルの使用前、使用後のノズル穴径の変化を Table 5 に示す。

Table 5 ノズル材質による耐摩耗試験結果

	材質	硬度 HV	ノズル穴径 使用前 (mm)	ノズル穴径 使用后 (mm) 使用時間 5 分	ノズル穴径 使用后 (mm) 使用時間 10 分	ノズル穴径 使用后 (mm) 使用時間 5 時間
①	SUS630	460	0.22	0.33	—	—
②	FF20 合金	2000	0.20	0.25	0.33	—
③	BL105 合金	2400	0.21	0.25	0.32	—
④	開発材料	1850	0.21	0.22	0.27	—
⑤	ダイヤモンド	8000	0.22	0.22	0.22	0.22

ここで、ノズル径と圧力の関係式は

$$Q = C \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2gP}{\gamma}}$$

Q: 液体流量(l/min) C: 補正係数 D: オリフィス直径(mm)

g: 重力の加速度(m/s²) P: 圧力(MPa) γ: 液体の密度(g/cm³)

であり、流量 Q を一定とした場合、摩耗によりノズル径 D が拡大すると圧力 P が降下する。

ノズル①、②、③は使用時間 5 分以内で圧力が降下し、使用時間 10 分では①、②、③、④、共に圧力が降下、①、②、③は圧力 100MPa 以下となった。⑤のダイヤモンドノズルは 5 時間使用し、圧力の降下が見られず、ノズル径にも変化は無かった。ダイヤモンドノズルを除くと、ノズル④の開発材料は②の FF20、③の BL105 に比べて耐摩耗に優位性が見られるため、今後更なる耐摩耗性の向上について研究開発を進める必要がある。

また、噴射ノズルから吐出された後の高圧水は砥粒と混合され Fig. 51 内の整流ノズルを通過する。その際、高圧水流と砥粒の衝突により整流ノズル内壁が摩耗する。この整流ノズル材質に開発材を適用することで、耐摩耗性の向上をはかることも可能と推定される

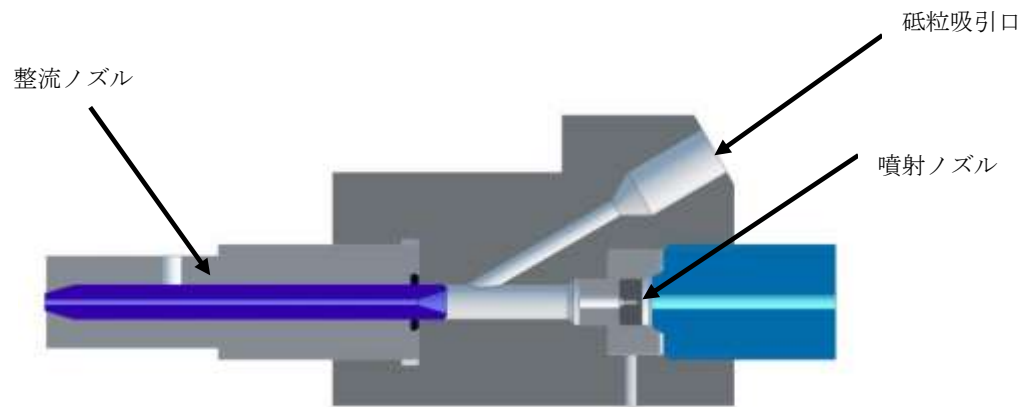


Fig. 51 高圧水吐出部図面

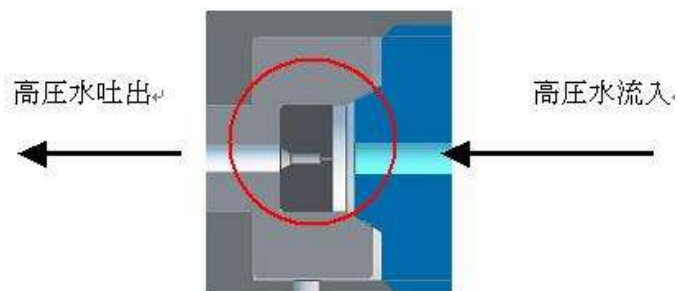


Fig. 52 噴射ノズル 拡大

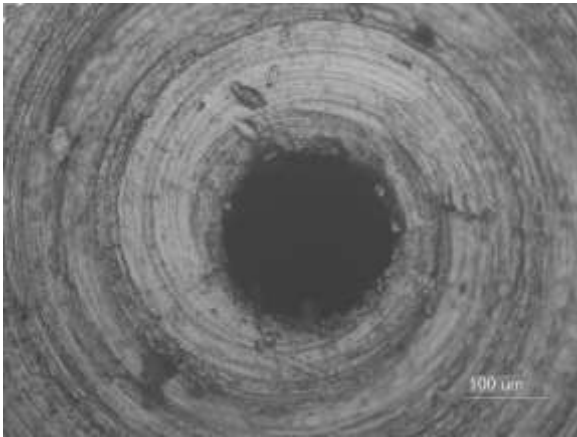


Fig. 53 SUS630 使用前 ϕ 0.22

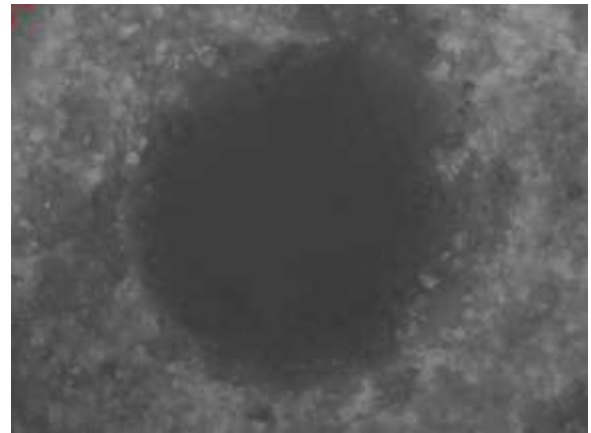


Fig. 54 SUS630 5分使用後 ϕ 0.33

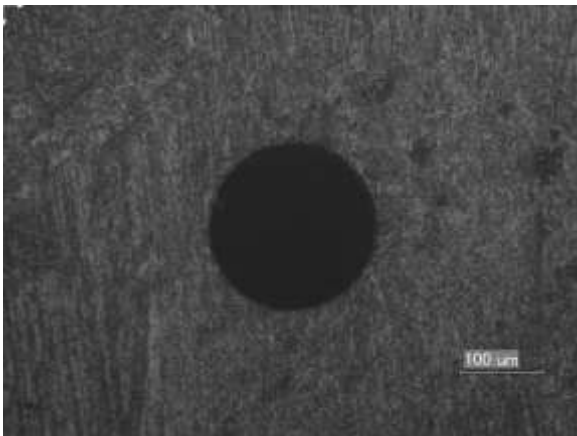


Fig. 55 FF20 使用前 ϕ 0.20

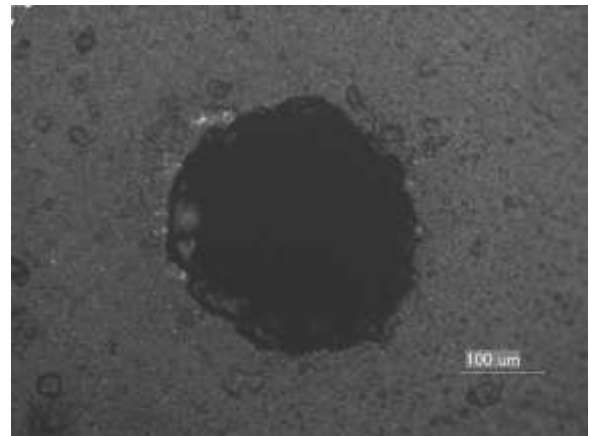


Fig. 56 FF20 10分使用後 ϕ 0.33

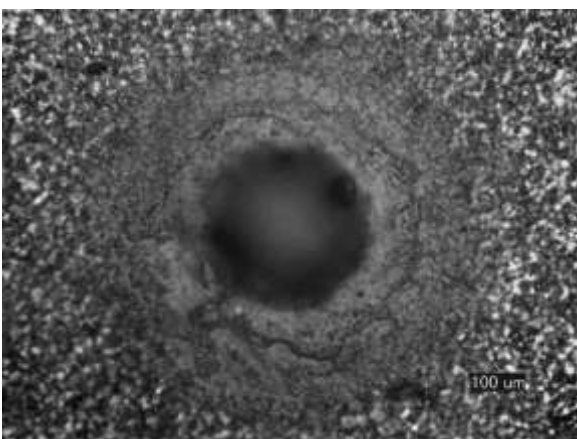


Fig. 57 BL105 使用前 ϕ 0.21

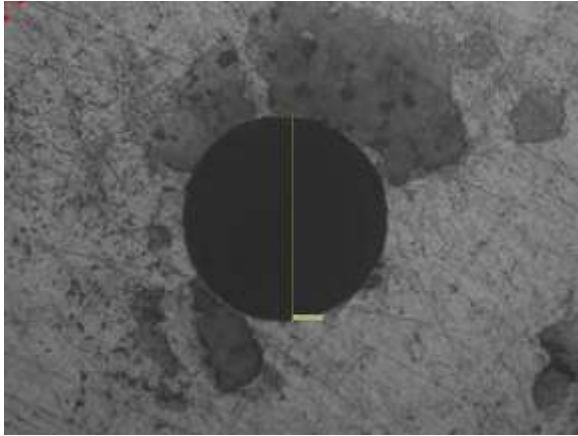


Fig. 58 開発材 使用後 $\phi 0.21$

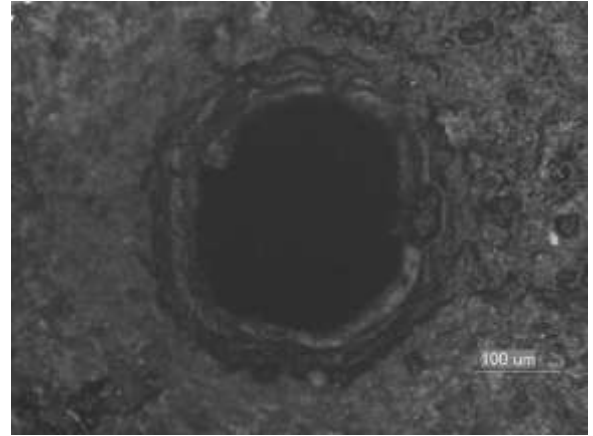


Fig. 59 開発材 10 分使用 $\phi 0.27$

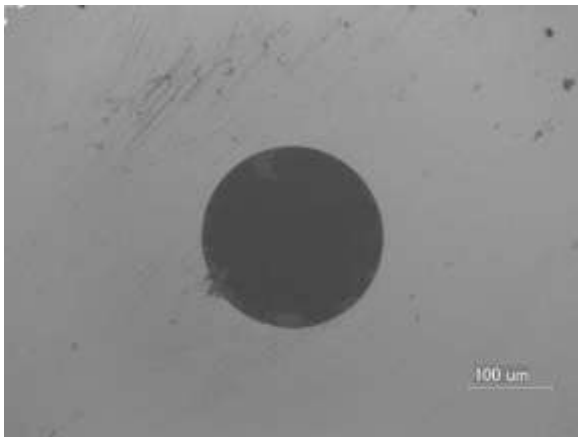


Fig. 60 ダイヤモンド 使用前 $\phi 0.22$

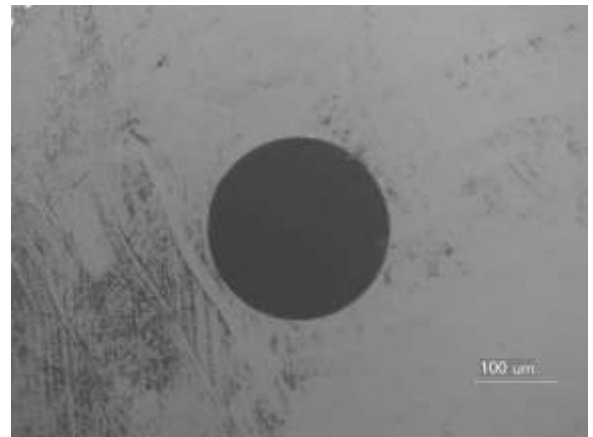


Fig. 61 ダイヤモンド 5 時間使用 $\phi 0.22$

2. 4 難削材の切削条件などについての検討

耐摩耗性材料は難削材であるため、加工性に乏しい。ノズルとして使用するため摩耗材に直径を 0.2mm とする真円加工が必要であり、工具摩耗を検討することにより、最適な工具材種・形状を見出すことが重要である。そこで切削条件や加工方法等の検討を行った。

①試験方法

- 1) 加工諸元
- 2) 耐摩耗材料 2
- 3) 工具種類 BN350 (住友)
- 4) 切削条件 ダウンカット、送り=0.02mm/刃、切込み=0.1mm
切削速度=80m/min、ピックフィード=0.1mm
- 5) 工具傾斜角 被削材を送り方向と直角
A=5°、B=10°、C=20°

②試験結果

これまで φ6 ボールエンドミル切削試験において、傾斜切削により若干の工具寿命の増加が期待できることが知られており、今回工具傾斜を 5°、10°、20° と変化させ試験を行った。

工具傾斜角の異なる加工における切削時間と背分力の関係を Fig. 62 に示した。

- ・傾斜角 10° は、5°、20° のものに比べて背分力の増加が少なく、寿命が長い結果となった。
- ・傾斜角 20° では、加工中の音が大きく、ビビリが発生し、約 280N で工具が折損した。これは傾斜角が大きくなると、工具の回転中心では被削材との接触がなく、切削負荷が回転中心から外側に離れた所に作用するためと思われる。
- ・傾斜角 5° は、ほぼ回転中心でも被削材と接触しており、ビビリが抑制されるが、切削速度がほぼ 0 の中心部分では、むしりとり加工が行われるため、抵抗が大きくなるとと思われる。

Fig. 63 に各傾斜角での加工力波形を示した。図はほぼ同じ加工時間のものであり、背分力波形に特徴がある。きつい傾斜角は、プラス方向の背分力が大きいだけでなく、マイナス方向の背分力も大きくなっている。これは、傾斜をつけたことによって円周方向の加工力が、被削材を持ち上げる方向に働くためと思われる。背分力の振幅が大きくなることも、ビビリ振動発生要因の一つと思われる。

③まとめ

難削材といわれる耐摩耗材料の切削加工は、十分に可能であることが分かった。加工に際して、工具傾斜角は 10° 前後が望ましいが、傾斜角

が大きすぎると、ビビリ振動が起こり、工具の折損につながる。

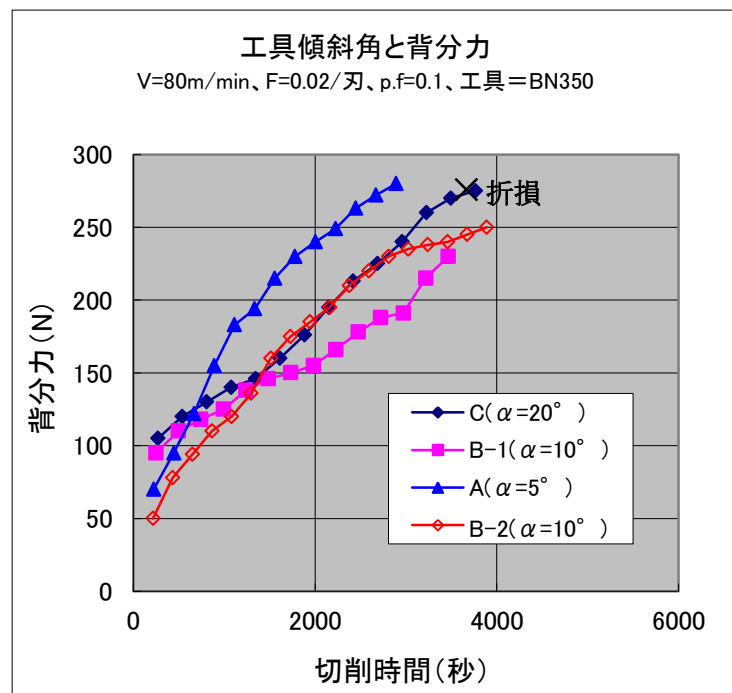


Fig. 62 切削時間と背分力(傾斜角比)

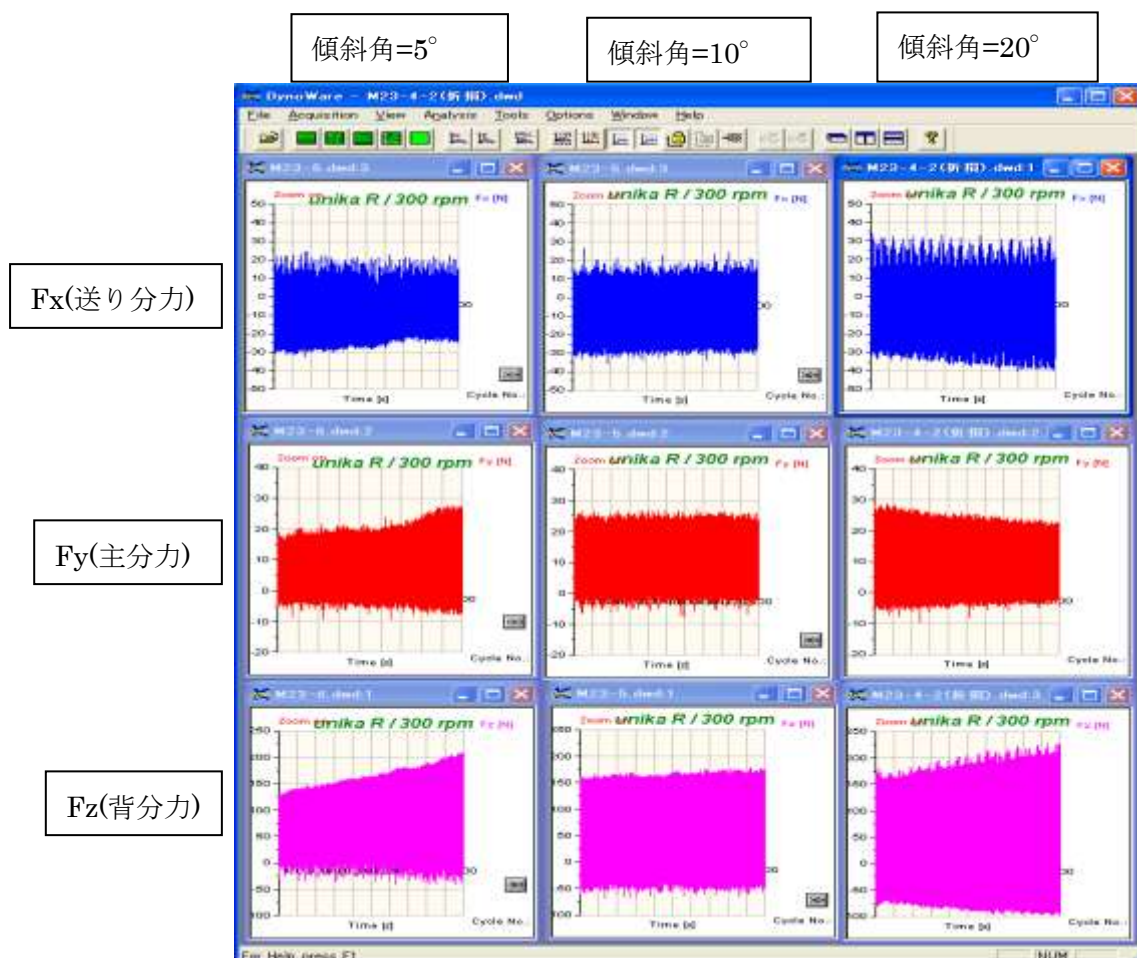


Fig. 63 傾斜角と加工力波形の例

3. ならい制御装置の開発

市販のシングルアームロボットを利用・改造して、遠隔操作にて鋳物のバリおよび湯口を切断できるようにするため、ティーチング作業など、ならい制御を行う為の基礎データの作成を行った。

3. 1 ウォータジェットノズル制御

湯口切断、押し湯切断、バリ取り作業を連続動作にて行う場合、高圧水噴流ノズルの位置制御を行う必要がある。

今回対象の湯口、押し湯部の切断、半円型鋳物ワーク切断においても、湯口の形状、切断幅をあらかじめタッチセンサーにてティーチングし、認識したテーブルデータをもとに、ウォータージェットノズルが移動、切断を行う方法を採用した。

鋳物には多種の形状があるため、当面はティーチング操作によりワークを認識させ、倣い制御を行う。

(1) 倣い制御装置構成

上述した倣い制御を確立するため、下記の装置構成とした。

- ① ロボット先端のノズル、位置認識センサーのアセンブリ開発
- ② 6軸多関節位置制御ロボットを採用
- ③ ロボット先端にノズル、位置認識センサーを取り付け

(2) 倣い方法

①大型鋳物用ウォータージェット切断装置

位置認識タッチセンサー部を対象ワークの切断位置に4点以上接触させ、ティーチング操作を行う。初期段階においてティーチングする位置に対してロボットアームを手動（操作パッド）にて移動しなければならないが、同様のワークである場合には、自動にてティーチング位置にロボットアームが動く。ただし、ワークごとの切断誤差を修正するために、4点以上のティーチング動作は行われる。

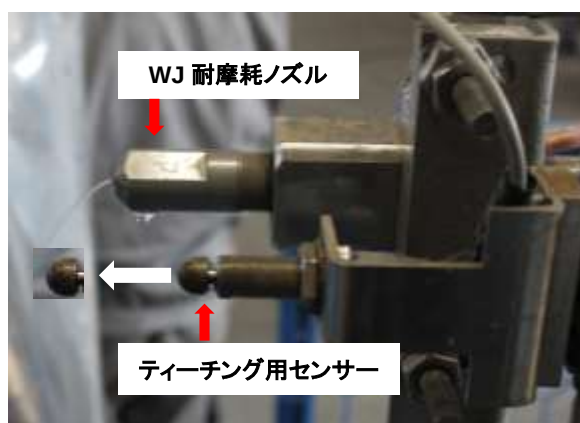


Fig. 64 ティーチング用センサー部

3. 2 倣い装置の改良

平成 22 年度は、ならい装置に関して、6 軸アームロボットの WJ ノズル部付近に伸縮式のタッチセンサーを配置し、事前にワークに対してティーチングを 3～4 点行い、自動でワークの切断が可能となった。しかし、ティーチング動作などのプログラムが複雑であるため、平成 23 年度は、プログラムのパターン化、WJ 本体とロボットの連動、切断後の自動終了など作業省力化、自動化へ向けて更なるマンマシンインターフェースの改良を行った。

(1) 従来動作

ウォータージェットにて切断を行うためには、高圧水と共に砥粒を混入して吐出する必要がある。従来の装置において、砥粒の ON、OFF 制御は砥粒タンク及びロボット先端の高圧水吐出ノズルに取り付けてあるボールバルブにて行っていた。ボールバルブは作業者が機側へ移動し、手動で開閉する。

従来の操作手順を以下に示す。

操作手順

- (1) ウォータージェット制御盤にて昇圧動作開始、昇圧完
- (2) 作業者が機側へ移動
- (3) 砥粒タンク側 ボールバルブ 開
- (4) 高圧水吐出ノズル側 ボールバルブ 開
- (5) ロボット制御盤へ移動
- (6) ロボットティーチングペンダントからロボットの動作開始指示
- (7) 切断、バリ取り動作終了
- (8) 作業者が機側へ移動
- (9) 砥粒タンク側 ボールバルブ閉
- (10) 高圧水吐出ノズル側 ボールバルブ 閉
- (11) ウォータージェット停止

(2) 改良内容

上記のボールバルブ 2 箇所をエアオペレート型バルブに変更した。作動エアの ON、OFF はウォータージェット制御盤、またはロボットティーチングペンダントからの出力信号でソレノイドバルブ 1、2 を操作して切り換える。ウォータージェット制御盤にはバルブ操作のボタンを追加した(Fig. 65)。切り換えの出力信号はロボット動作プログラム内にも組み込むことができ、ロボットの切断動作前後に自動で砥粒の ON、OFF 操作を行うことが可能となる。上記の従来操作手順から(2)、(3)、(4)、(8)、(9)、(10)が省略できる。

これにより砥粒 ON、OFF の遠隔操作及び切断作業の簡略化、さらに作業者の安全

性も向上した。

改良後の 操作手順

- (1) ウォータージェット制御盤にて昇圧動作開始、昇圧完
- (2) ロボット制御盤へ移動
- (3) ロボットティーチングペンダントからロボットの動作開始指示
- (4) 切断、バリ取り動作終了
- (5) ウォータージェット停止

※(4)の前後に砥粒の ON、OFF 切り換え動作が自動で行われる。

(3) まとめ

マンマシンインターフェースの改良を行うことで、これまで 11 工程あった作業手順が 6 工程省略されることによって、作業効率の改善および作業従事者への負担低減となった。



Fig. 65 WJ 制御盤 バルブ操作ボタン追加

4. 水回収および防錆剤の製品への影響調査

ウォータージェットによる鋳物バリ取りおよびショットブラスト（砂落とし）において発生する鋳物砂および混合したグライнда屑などの回収を目的とした水回収装置の検討を行う。ウォータージェットの切断においては、水を使用するため、ワークに錆が発生する。平成 22 年度は、錆を抑制するために、防錆剤の製品への影響調査を行い、pH11 付近がもっとも効果のある値となった。平成 23 年度は、継続して防錆剤の影響調査を行い、また、水溶性切削油剤の使用なども考慮におき開発を進めた。

4. 1 大型鋳物への防錆剤の影響調査

ウォータージェットバリ取り装置を使用し湯口、バリ等を切断した場合、水の飛散により錆びの発生が考えられその対策を事前に調査しておくことが必要なため、サンプル品として取り寄せた 2 種類の防錆剤で錆びの発生を観察した。

- ・製品外面の溶射皮膜、内面のエポキシ粉体塗膜の密着性にも影響がないことは確認済み。
- ・リン酸塩皮膜処理工程の最終水洗層に添加し、リン酸塩皮膜剤の後処理として防錆力を強化する。

防錆剤「サプロテック RH-7K」

性質	アルカリ性液体
荷姿	プラスチック容器入り 18k g
化学名	鉄鋼用防錆剤
成分及び含有量	トリエタノールアミン 3～8%含有 モルホリン 3～8%含有
比重	1.03（15℃）

	VpCl-649			VpCl-377		
実施日	添加量	ph 値	観察結果	添加量	ph 値	観察結果
6/23	0.5%	8～9	錆発生 ほぼ錆なし (一部には見られた)	1.0%	7～8	錆発生
7/5	1.0%	9～10		1.5%	7～8	錆発生
7/9	-	-		2.0%	7～8	若干錆発生
7/12	-	-		2.5%	7～8	若干錆発生

上水道管路に使用される水道用ダクタイル鋳鉄異形管では、製品の規格上、水圧試験が必要である。そこで、水圧試験機を使用し製品内に水を満たし、プランジャーポンプで 3Mpa で 10 秒以上保持し漏水の有無を検査している。

防錆剤未使用の場合、水圧後の製品は4時間経過後で写真のように内面及び外面に錆が発生する状況となり、塗装前に再ショットや内面はグラインダ処理を行っている。

	防錆剤		状 況
	投入量 (リットル)	添加 (%)	
5 日間	始業時循環タンク 6.0	0.29	循環タンクには、日毎始業時に防錆剤を 2 ℓ 減らし 6 ℓ 投入。ポンプ用タンクには、1 回につき 0.3 ℓ 減らし 2 時間毎に 1.5 ℓ を投入。 <u>錆の発生なし</u>
	2 時間毎ポンプタンク 1.2	1.94	
6 日間	始業時循環タンク 4.0	0.19	循環タンクには、日毎始業時に防錆剤を 2 ℓ 減らし 4 ℓ 投入。ポンプ用タンクには、1 回につき 0.3 ℓ 減らし 2 時間毎に 1.5 ℓ を投入。 <u>錆の発生なし</u>
	2 時間毎ポンプタンク 1.0	1.6	



Fig. 66 水圧試験機



Fig. 67 防錆剤 添加前



Fig. 68 防錆剤 添加後

4. 2 小型鋳物への防錆剤の影響調査

小型鋳物であるデフケースのバリ取り作業においてウォータージェットの吐出水として切削油（Syntilo77EF）を 8% 希釈した水を使用し、防錆効果を確認した。

切削油を使用することによるウォータージェット切断機本体への影響は特に無く、デフケースに対してもバリ取り後 15 日経過したが、目視にて錆の発生は見られなかった。



Fig. 69 切削油を使用した WJ によるバリ取り

4. 3 水回収装置による切削水の再利用

小型鋳物用ウォータージェット切断機におけるワークテーブル下部に水受け部を設け、切削水および砥粒の回収槽として活用し、またワークテーブル外部に砥粒沈殿槽を設け、砥粒と排水を分離し切削水の再利用を検討した。

排水は砥粒の混合を防ぐため、濾過フィルター通過後、再度ウォータージェット切断機へ供給が行われたが、ウォータージェット切断機内部の配管つまりもなく、排水の再利用も問題ないことが判明した。

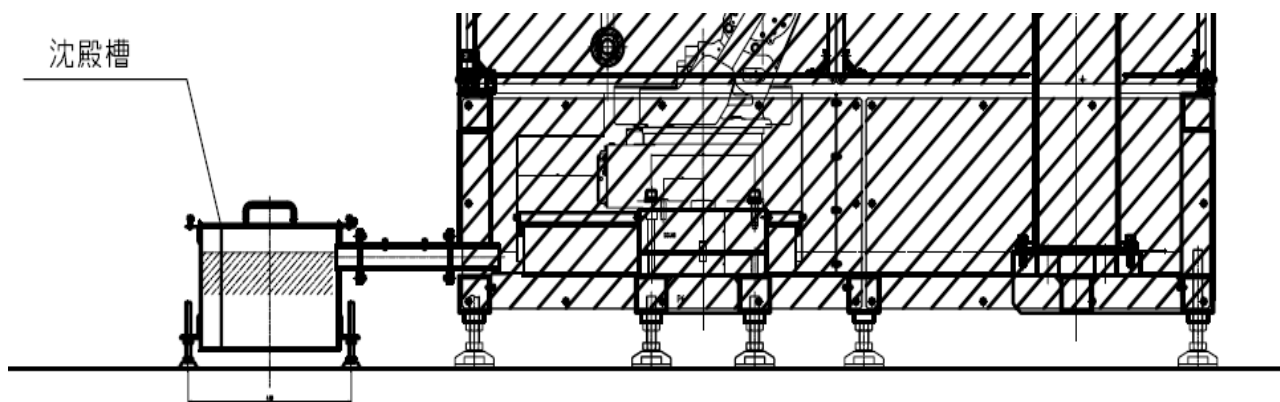


Fig. 70 ワークテーブル水受け部と沈殿槽 装置図



Fig. 71 砥粒沈殿槽



Fig. 72 ワークテーブル水受け部

5. 事業化への検討

本事業において開発されたウォータージェットバリ取り装置の商品化を目指し、販売形態など事業化へ向けての検討を重ね、市場を開拓し、販路拡大を検討した。

大型鋳物においては、従来では堰、湯口を切断するために、グラインダーによる手作業が発生し、大型鋳物の堰、湯口は直径 50mm 程度の大きさのため作業者に掛かる負荷（重筋労働）も高く、1 日当たりの作業量も限定される。ウォータージェットバリ取り装置を活用することによって、この重筋労働が改善されることが判明した。しかし、手作業での切断が、約 3 分に対して、ウォータージェットバリ取り装置の切断速度がティーチング作業も含め約 18 分と 6 倍以上の時間が必要となるため、作業量の低下が発生する。作業時間を短縮することが大型鋳物を対象としたウォータージェットバリ取り装置の事業化に必要な点である。

小型鋳物においては、通常グラインダーでのバリ取り作業時に発生する「かえりバリ」が、ウォータージェットバリ取り装置においては発生しないため、「かえりバリ」発生による製品組み込み後の不良が無く、製品品質が良い点が評価される。しかし、作業速度においては、手作業によるバリ取りは約 18 秒、従来のバリ取り専用装置で約 27 秒、ウォータージェットバリ取り装置では約 60 秒と最も遅く、大量生産が必要となる小型鋳物においても、切断速度の向上が事業化に必要な点である。

また、販売価格においても、従来のバリ取り専用装置を約 2,000 万円と設定した場合、現状の作業能力ではウォータージェットバリ取り装置の価格が半額である 1,000 万円であれば、作業に 2 倍の時間を要したとしても、2 台設置することで生産量は確保できる。

事業化を目指すに当たり、切断速度を現状の 3 倍程度に改善することが可能であれば、重筋、振動を伴う劣悪作業の効率化、作業環境の改善が可能なため、需要が見込まれる商品である。

6. 総括

①ウォータージェットによるバリ取り装置の開発

- ・大型鋳物用ウォータージェット切断装置を開発し、厚さ 90mm 程度の湯口まで切断することが可能となった。
- ・小型鋳物用ウォータージェット切断装置を開発し、シングルシリンダー化による本体の小型化、またノズルの先端形状の新規開発を行い、小型鋳物のバリ取りに適用が可能となった。
- ・小型鋳物であるデフケースのバリ取りのため、サーボモータ駆動による回転テーブル及び治具を設けた専用ワークテーブルを開発し、寸法公差がある鋳物に対応し、切断効率が向上した。
- ・切断速度を向上させる目的で、ウォータージェット切断機の改修を行い、高圧水吐出量増加、砥粒最大量増加、砥粒径増により切断力が約 4 倍に向上した。
- ・従来のバリ取り作業と比較して、湿式であり粉塵が舞わなく、作業環境が改善されることが見込まれ、作業者の負担が極めて少なく、省力化に務めている。

②噴射ノズルの耐摩耗材料の開発

- ・ウォータージェット切断噴射ノズル用耐摩耗材料の開発を行った結果、耐摩耗材料 2 は、滑り摩耗においては従来品である炭素鋼と比較して 5 倍、エロージョン摩耗においては一般鋳鉄の 10 倍もの耐摩耗性を有することが判明した。
- ・難削材といわれる耐摩耗材料の切削加工が、加工に際して、工具傾斜角は 10° 前後がに傾斜させることで、十分に可能であることが判明した。

③ならい制御装置の開発

- ・大型鋳物用として、位置認識タッチセンサーによるならい制御が可能となり、ウォータージェット切断ノズルを有したロボットアームによる自動切断が可能となった。
- ・ティーチング動作や切断作業までの流れが複雑であるため、ウォータージェット本体とロボットの連動、切断後の自動終了など作業省力化、自動化へ向けて更なるマンマシンインターフェースの改良を行い、従来 11 工程あった作業が 6 工程短縮されることによって、作業効率の改善および作業従事者への負担低減となった

④水回収および防錆剤の製品への影響調査

- ・防腐剤や切削油を添加した吐出水を使用することで、ウォータージェットバリ取り作業における鋳物の防錆が確認された。
- ・一度使用した切削水を水回収装置、砥粒沈殿槽を設け、濾過することによって、切削水の再利用が可能となった。

WJ による自動切断となることで、3K 対策となり、粉塵、振動、騒音が低減され、当初目標であった、作業環境改善、周辺環境への配慮は達成できた。

現在、鋳物業における重筋作業改善は、高齢化および若年層離れから、重要な問題であるウォータージェット切断による重筋作業改善が見込まれ、安価に提供が可能であれば、事業化が見込まれる。