

平成 2 1 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「難切削金属材料に対応した切削加工技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成 2 2 年 3 月

委託者 中部経済産業局

委託先 財団法人岐阜県産業経済振興センター

目 次

第 1 章	研究開発の概要・・・・・・・・・・・・・・・・	3
1－1	研究開発の背景・研究目的及び目標	
1－2	研究体制 (研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	
1－3	成果概要	
1－4	当該研究開発の連絡窓口	
第 2 章	加工方法への対応・・・・・・・・・・・・・・・・	9
第 3 章	最適工具開発への対応・・・・・・・・・・・・・・・・	11
第 4 章	インバー材の溶接課題への対応・・・・・・・・	16
第 5 章	全体総括・・・・・・・・・・・・・・・・	20

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

航空機産業分野では燃費向上のため炭素繊維強化プラスチック（以下、CFRPという）の利用が拡大しているが、CFRPの成形用金型は、難削材であるインバー材が用いられることから、当該素材に対する高速切削加工技術及び溶接技術の確立を図る必要がある。また、CFRPの利用拡大に伴い、難削材であるチタン材利用も拡大し、これに係る高速切削加工技術も必要となる。以上から、インバー材及びチタン材に係る適正工具の開発並びに高速切削加工技術確立に係る研究開発を行うとともに、インバー材については、併せて溶接技術の確立に係る研究開発を行うものである。

- ・インバー材及びチタン材の切削加工について、それぞれについて技術目標値を設定する。

加工条件と目標値

区 分		加工条件	研究開発時	目標値
インバー材	切削重量	ソリッドEM, Ti-Alコーティングφ20	25cc/min	150cc/min
	加工面粗度		Ra50	Ra25
	工具寿命	現状： ソリッドEM, Ti-Alコーティングφ20	100m (1,200cc)	1,000m (3,600cc)
チタン材	切削量	切削油： 主軸クーラント, スルースピンドルクーラント	25cc/min	50cc/min
	加工面粗度		Ra25	Ra12.5
	工具寿命	現状： スローアウェイ EM	5m (800cc)	10m (1,600cc)

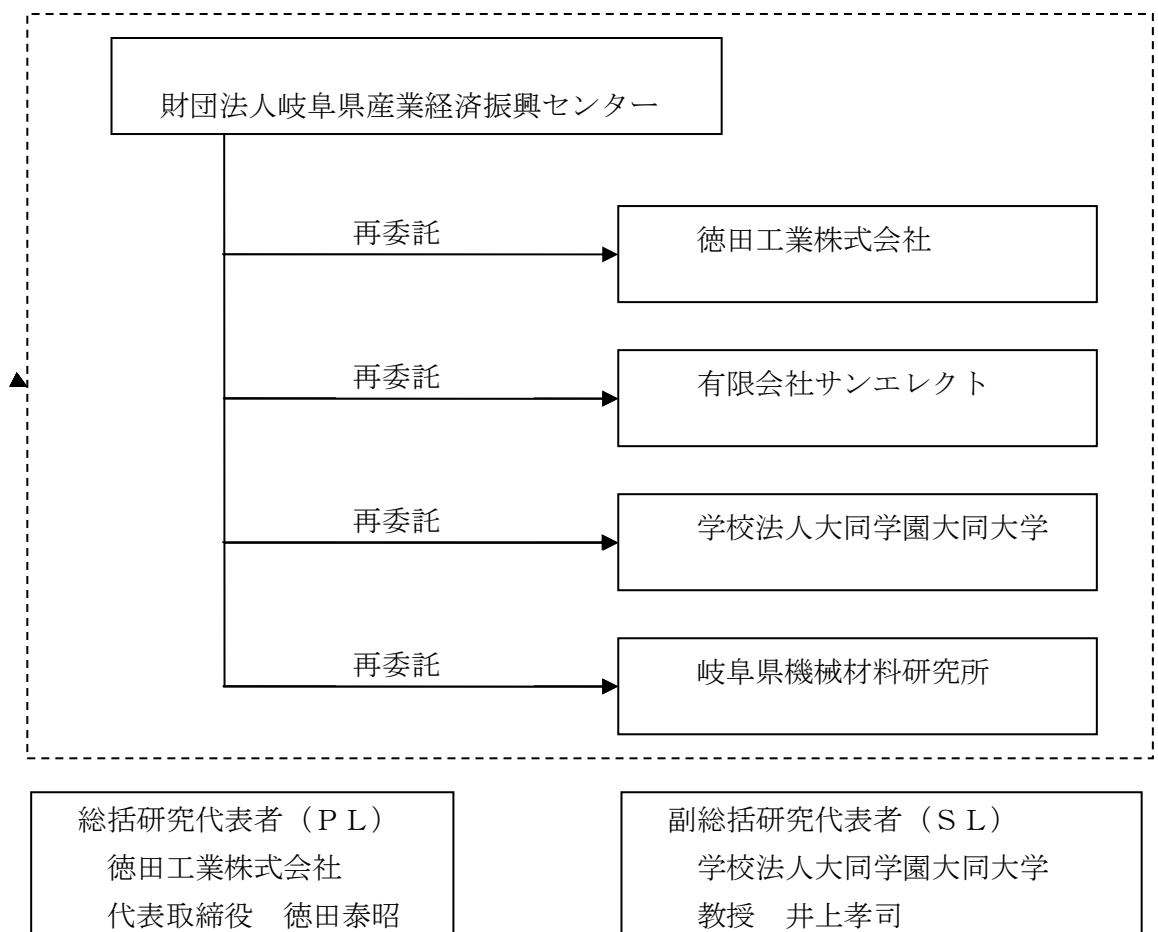
上記加工目標値を達成するための切削速度、送り速度等の加工条件の開発と要求精度の維持確立に向けて、トータル的な観点から、コストを意識しての研究により解決を図る。

- ・インバー材の溶接加工について、それぞれについて技術目標値を設定する。

区 分	加工条件	研究開始時	目標値
溶接量	開先角度 60° 多層盛り（10～12回）	40cc/H	100cc/H
ピンホール等の溶接欠陥		1m/20箇所	1m/ 2 箇所 以下
溶接作業の自動化による 溶接作業のスピードアップ	現状：TIG溶接による 手動溶接 目標：TIGにより 自動化	800mm/H	2000m/H

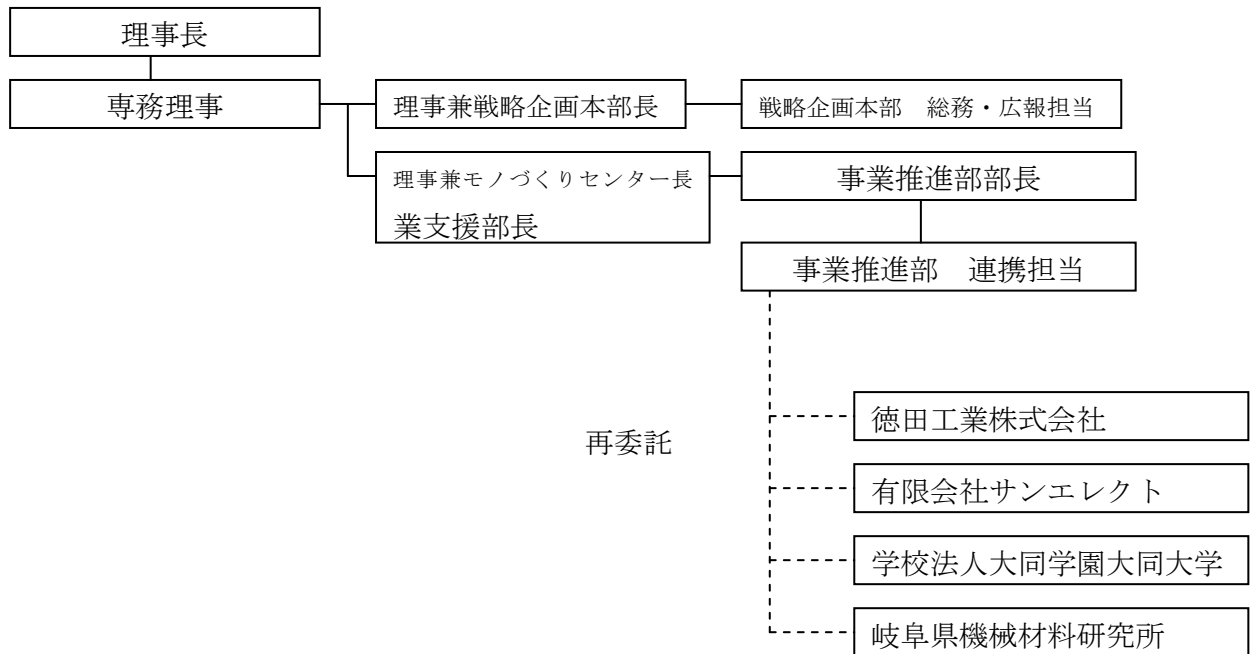
1－2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

（１） 研究組織（全体）



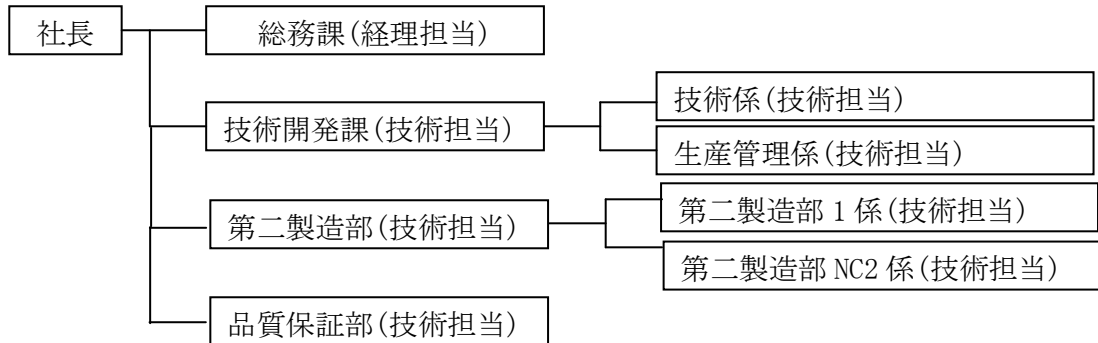
(2) 管理体制

① 事業管理者 [財団法人岐阜県産業経済振興センター]

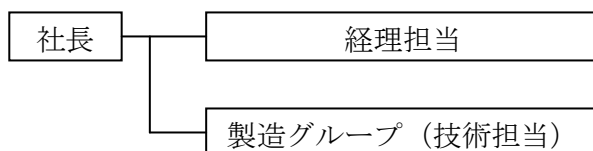


② 再委託先

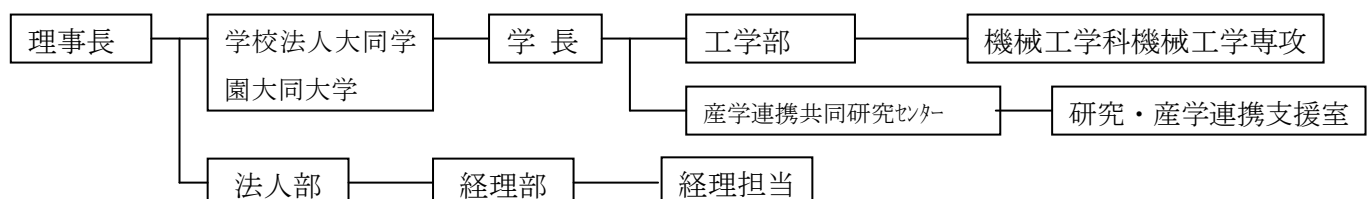
徳田工業株式会社



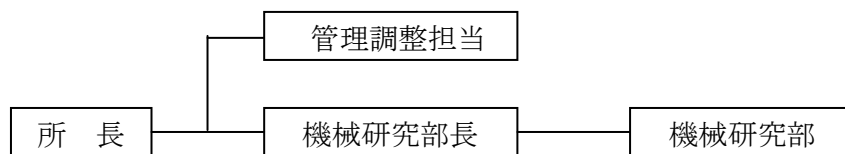
有限会社サンエレクト



学校法人大同学園大同大学



岐阜県機械材料研究所



(3) 管理員及び研究員

【事業管理者】 財団法人岐阜県産業経済振興センター

氏 名	所属・役職	実施内容
砂田 博	モノづくりセンター長	プロジェクトの管理運営
服部 清	事業推進部 部長	
繁田 栄司	事業推進部 参事	
野村 貴徳	事業推進部 主査	
小川 誠	事業推進部 主査	

【再委託先】

徳田工業株式会社

氏 名	所属・役職	実施内容
徳田 泰昭	代表取締役	・切削特性の試験 ・切削シミュレーションによる最適切削条件の構築 ・切削工具のデータ収集、分析 ・インバー材及びチタン材の製品精度の向上のための試験 ・インバー材及びチタン材の高速切削に対する適正工具の検討 ・工具の刃形、すくい角等の検討 ・インバー材に係る溶接技術の検討
村井 正明	生産管理部・部長	
大木 啓司	技術開発課・課長	
河津 貴彦	技術開発課・技術係長	
辻 正幸	品質保証部・主事	
水野陽一郎	第二製造部一係・技能士	
粥川 誠一	生産管理部生産管理1係・係長	
伊佐地弘章	生産管理部設計係・係長	
杉原 勇輝	技術開発課技術係・係員	
葦澤 正雄	技術開発課技術係・係員	
笹田 猛	技術開発課技術係・係員	
野村 泰久	第二製造部 NC 2 係・技能士	

有限会社サンエレクト

氏 名	所属・役職	実施内容
川瀬 正浩	代表取締役	・インバー材及びチタン材の高速切削に対する適正工具の検討 ・工具のコーティングの検討 ・工具の刃形、すくい角等の検討
森 公志	製造グループ・リーダー	

学校法人大同学園大同工業大学

氏 名	所属・役職	実施内容
井上 孝司	機械工学科・教授	・切削特性の試験

岐阜県機械材料研究所

氏 名	所属・役職	実施内容
竹腰 久仁雄 加賀 忠士 安藤 敏弘 板東 直行	機械研究部・部長 機械研究部・専門研究員 機械研究部・主任研究員 機械研究部・主任研究員	・切削シミュレーション による最適切 削条件の構築 ・切削工具のデー タ収集、分析

(4) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

財団法人岐阜県産業経済振興センター

(経理担当者) 戦略企画本部 主任 大堀 明雄
(業務管理者) 事業推進部 主査 小川 誠

(再委託先)

徳田工業株式会社

(経理担当者) 総務課長 三輪 義彦
(業務管理者) 技術開発課長 大木 啓司

有限会社サンエレクト

(経理担当者) 総務・経理担当 市橋 明子
(業務管理者) 製造グループリーダー 森 公志

学校法人大同学園大同工業大学

(経理担当者) 経理室長 志水 登
(業務管理者) 研究・産学連携支援室
支援室長 清水 孝純

岐阜県機械材料研究所

(経理担当者) 管理調整担当 平工 吉江
(業務管理者) 機械研究部長 竹腰 久仁雄

1－3 成果概要

(1) 加工方法への対応

今年度の研究にて開発した工具を中心として実部品を想定した加工方法についての検討・試験をすることにより、加工時間・コストを考慮した工程を概ね固めることができた。それによってチタン加工では従来より加工時間は50%程度の削減が見込める。今後は試験により出てきた課題を克服し、事業化していく予定である

(2) 最適工具開発への対応

インバー材においては昨年度製作した工具を改良し工具寿命を大幅にアップさせることができたため、排出量・寿命ともに目標値を達成することができた。
またチタン材においても形状・材質・コーティングの最適化をして排出量・寿命ともに目標値を達成することができた。

(3) インバー材の溶接課題への対応

平面／斜面形状でブローホール等の溶接欠陥のない高品位な溶接をすることが可能になり、さらには斜面溶接の条件見直しによるスピードアップにより、平面／斜面を総合して溶接量／溶接スピードが目標値に到達した。
これらの基礎溶接条件を基に自動溶接機のカメラ撮影によるワークローテーション／開先位置の芯出し、AVCによる高さ調節機能を使用し、曲率形状を溶接することが可能になった。

1－4 当該研究開発の連絡窓口

財団法人岐阜県産業経済振興センター事業推進部 小川 誠

所在地：岐阜県岐阜市藪田南5丁目14番53号

電話：058-277-1093 FAX：058-273-5961

E-mail：ma-ogawa@gpc-gifu.or.jp

第2章 加工方法への対応

2-1 研究目的および目標

インバー材及びチタン材の切削特性について、加工コスト問題に対応可能なデータ収集と分析を行い、第3章で開発した工具および工作機械を含む新しい加工技術の確立を目指す。

2-2 概要

今回はインバー材およびチタン材の実製品を模擬し、切削試験を行う。工具は開発したものを適用し、加工条件・加工方法等を探りながら最適な加工工程を確立する。

2-3 研究内容

①加工機の振動特性の把握

インバー材およびチタン材の高効率加工を行うにあたり、加工振動の問題が事前試験において大きな問題となっていた。従ってタップテスト（振動解析試験）を行うことにより、加工機およびワークの振動特性を事前に把握し、振動の発生しにくい加工条件を導き出す。

②加工パス・加工工程の確立

開発した工具を中心として、実製品の形状を加工するプランを検討する。そして工具を含めた問題点を明確にし、加工技術の確立を行う。

2-4 結果

①加工機の振動特性の把握

加工機及びワークのタップテストを実施し、最適条件を検討した。その結果、加工条件によってある程度振動を制御することができた。

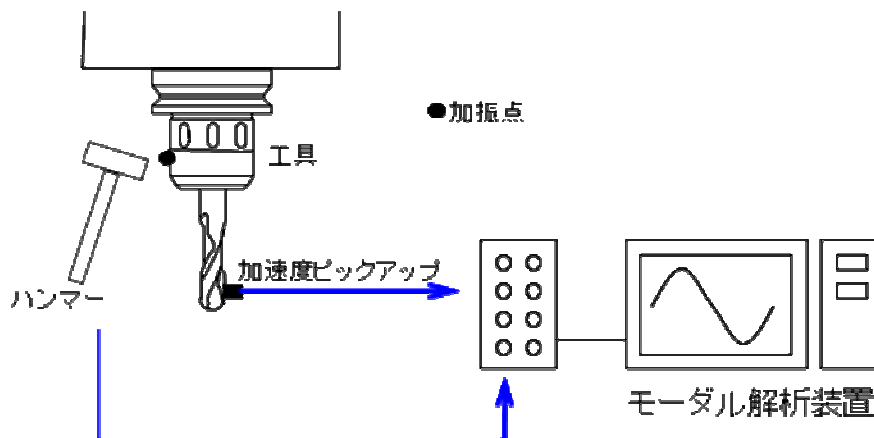


図2-1 解析方法の概略図

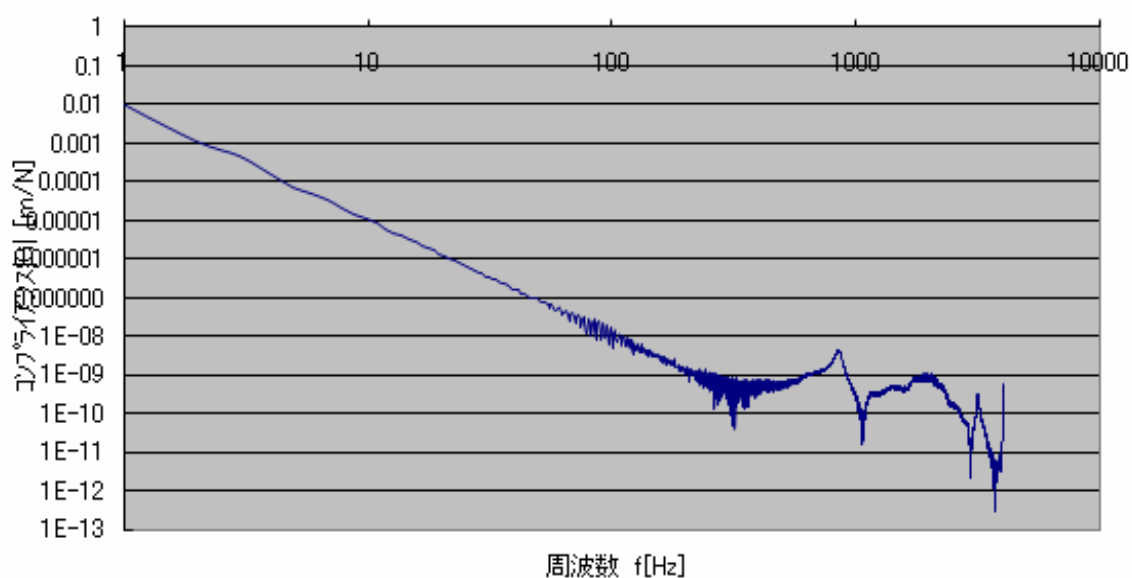


図 2 - 2 周波数応答曲線

②加工パス・加工工程の確立

開発した工具を中心として、実製品の形状を加工し、チタン部品の加工時間は半減させることができた。一部問題となるところもあったため、今後はその課題を解決するとともに加工技術の確立を行う。

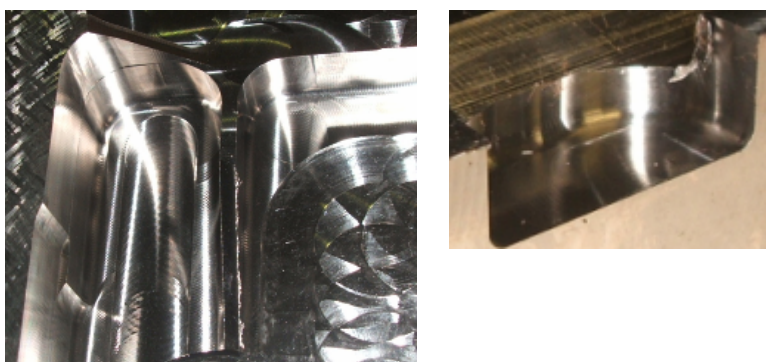


図 2 - 3 加工後のワーク

第3章 最適工具開発への対応

3-1 研究目的および目標

インバー材やチタン合金は耐食性や耐熱性に優れた特性を有するため、CFRP成型金型や航空機用部品等に幅広く利用されている。一般的にこれらの部材や製品を製作するには機械加工を必要とするが、工具摩耗の進行が早く難削材とされている。

従って、本研究では切削シミュレーションを中心とした工具形状の解析と同時に工具材種・コーティングの試験も行い、工具寿命の長い高機能な工具を開発する。

3-2 概要

弊社で想定しているインバー材の加工は高速・高送り加工である。最初に市販品の工具にて切削加工を実施したが、寿命が短く適切な加工ができなかった。またチタン材加工においては、現状の問題点として、工具費や加工時間の多さが挙げられる。特に荒加工における加工時間がとても多く、市販品では高効率加工が困難である。従って今回は本研究にてその問題を解決できるインバー材およびチタン材用の最適工具を開発する。

3-3 研究内容

①事前試験による切削特性の把握

市販品の工具を使用して、実際にインバー材やチタン材を加工し、加工条件や工具形状等による加工特性や加工機への影響についての傾向を確認する。

②2D切削シミュレーションによる切削特性の把握

シミュレーションを実施して、すくい角等の工具形状および加工条件による工具への熱的・力学的な影響を確認する。

③切削試験による材質・コーティングの影響把握

①②での結果から良さそうな工具形状を決定する。その工具形状にて材質やコーティングの違う工具を数種類製作し、材質・コーティングの影響を確認する。

④3D切削シミュレーションによる工具形状の確立

①～③での結果から、最適工具の方向性がある程度決定できる。そこで3Dにてシミュレーションを行うことで、最終的な3次元形状を検討する。

⑤切削試験による最終確認

④で導き出した形状に③で決定した材種・コーティングを組み合わせ、その工具を製作する。そして切削試験を実施することにより問題点等を明確にし、再度④⑤の作業を繰り返すことにより最適な工具の仕様を決定する。

3-4 結果

①事前試験による切削特性の把握

インバー材の切削を行った結果、高速加工では工具の刃先が赤くなり、熱の影響による工具摩耗が発生していることが確認できた（図3-1）。また工具形状によっては加工機負荷が大きく高送り加工も難しい状況であった。



図3-1 インバー用市販工具の形状別工具摩耗状況

またチタン材についても市販工具による切削試験を行った結果、工具の形状により、切削状況は大きく異なった。特に振動の状況や熱による摩耗状況に大きな差があった（図3-2）。また、大径の工具での深切り込み加工ではイケール側の振動が大きく、弊社の加工機で使用するには加工条件等の工夫が必要であることが分かった。



図3-2 チタン用市販工具の形状別工具摩耗状況

これらの試験により工具形状や工具素材等による加工への影響についての傾向をある程度掴むことができた。

② 2D切削シミュレーションによる切削特性の把握

2Dにて数パターンの工具形状を模擬し、インバー材およびチタン材を被削材として切削シミュレーションを行った結果、工具形状や加工条件によって工具への熱的および力学的な影響が大きく異なることがわかった（図3-3）。

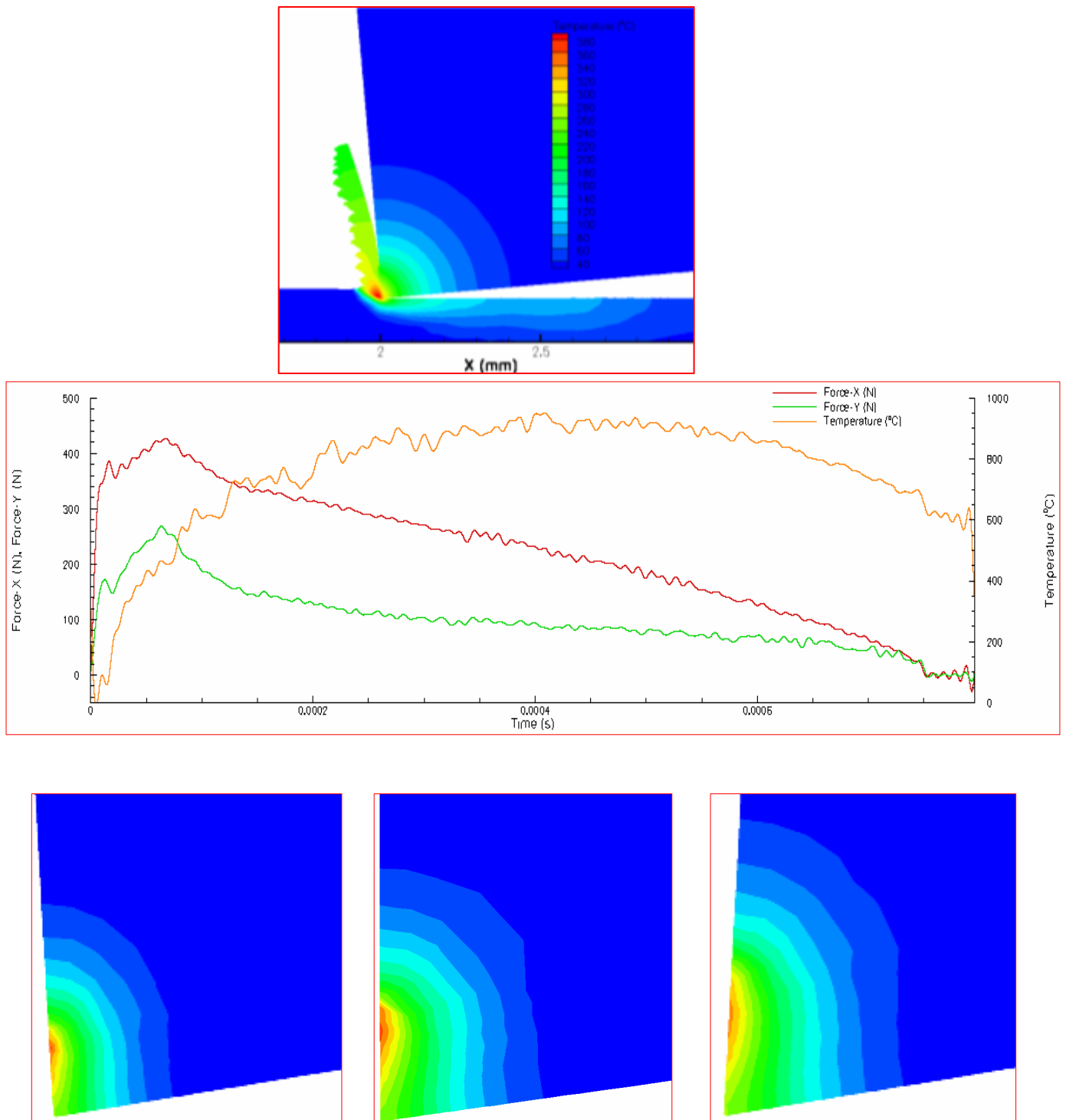


図3-3 2D切削シミュレーションの様子

③切削試験による材質・コーティングの影響把握

同じ工具形状で材質やコーティングのみを変更して同条件下にて切削試験を行った結果、切削状況や工具寿命が大幅に異なり（図3-4）、材種によってはすぐに折損するものもあった。特に超硬材では母材の成分や粒子サイズにより大幅に切削特性に違いが見られ、コーティングに関しても摩耗の進行具合に関しての違いが見られた。従って、インバー材およびチタン材の加工においてこれらの要素は非常に重要であることがわかった。

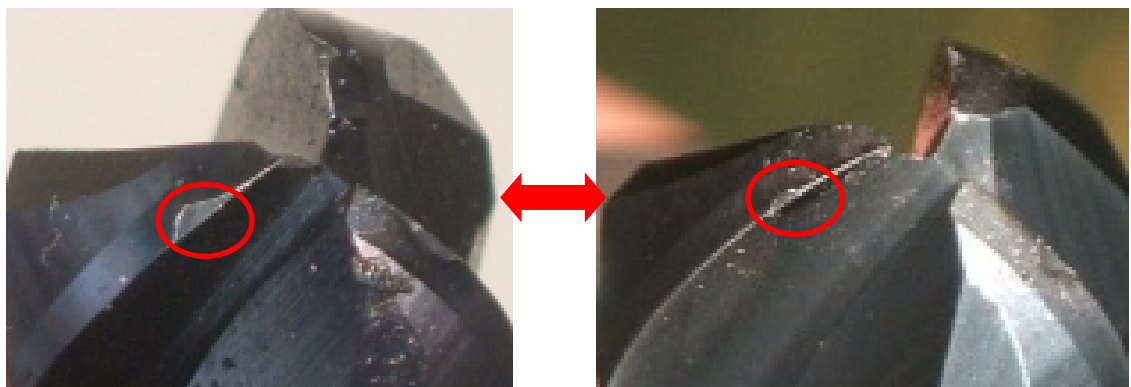
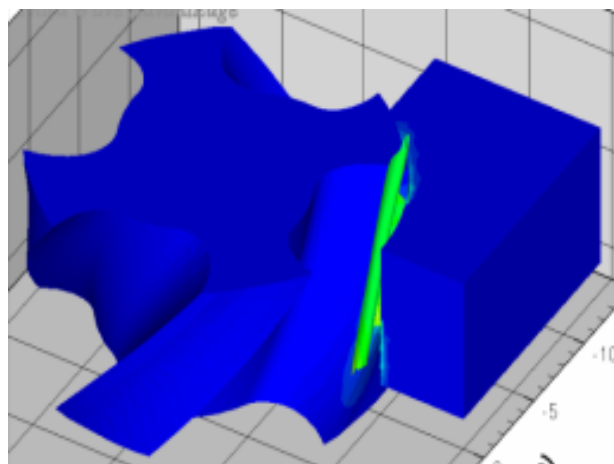


図3-4 インバー加工時のコーティングによる摩耗の差

④3D切削シミュレーションによる工具形状の確立

①～③の結果を考慮して最適と考えられる数パターン of 工具形状を決定した。そして工具研磨機に付属するシミュレーションソフトを使用して、実際に製作できる工具形状を模擬する。そしてその3次元形状を出力し3次元にて切削シミュレーションを行った。ここでの3次元工具モデルはシミュレーションの計算時間短縮のため必要な部分のみを抽出した。その後、その結果から熱および力学的な部分で一番優位性のある形状を決定した。



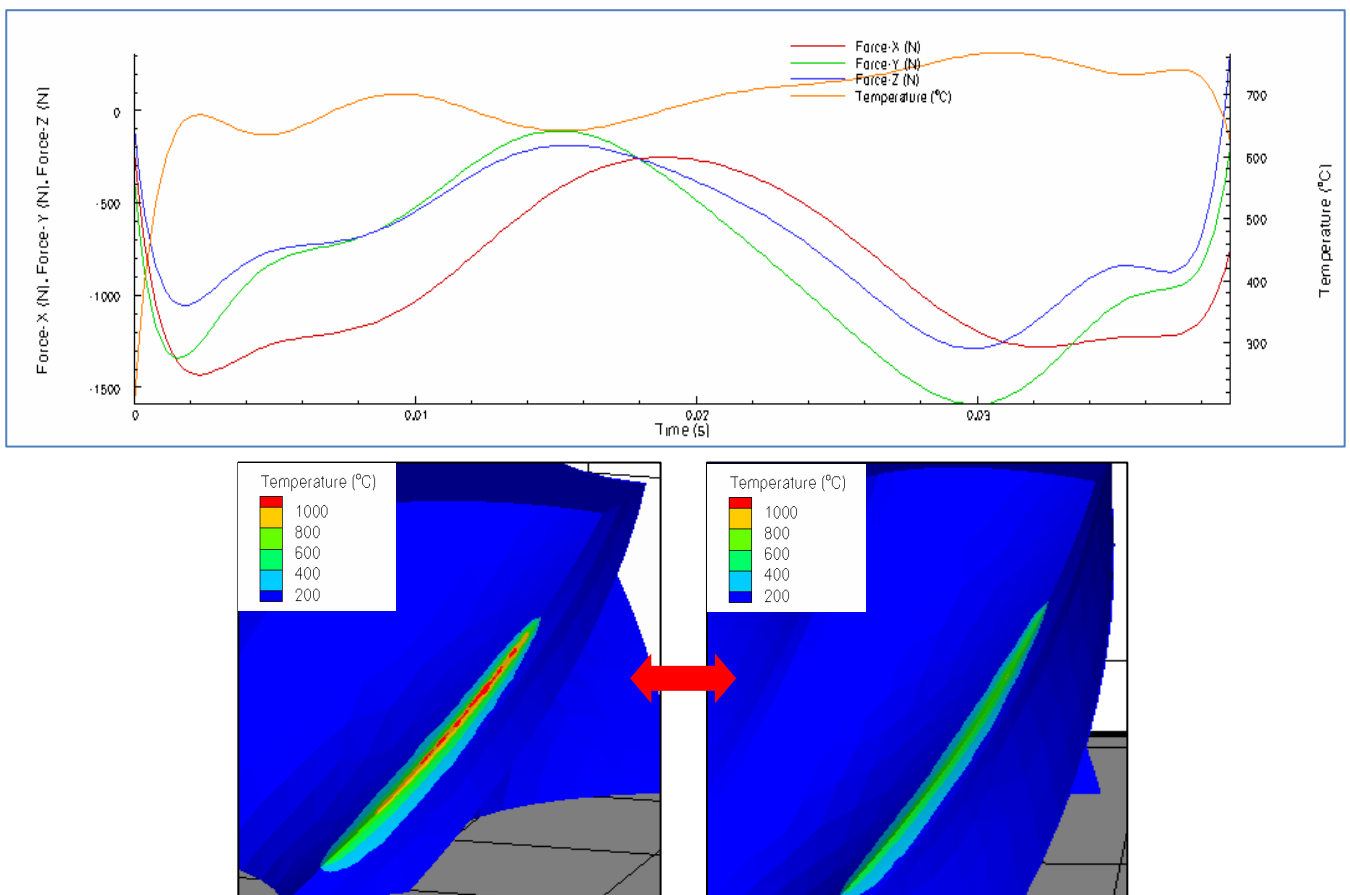


図 3－5 工具形状の違いによる刃先温度の差

⑤切削試験による最終確認

④でのシミュレーション結果から良好だと判断できる工具形状を決定した。そして③で決定した材種・コーティングを組み合わせ、工具を製作した。そしてその工具を用いて切削試験をした結果、ある程度良い結果が得られた。その後④と⑤の作業を繰り返しながら問題点を解決していき、最終的に目標値を達成できる最適な工具を導き出した。

3－5 研究成果

今回は切削シミュレーションを中心とした最適工具の開発を行った。切削シミュレーションでは主に工具形状の検討を重点的に行い、工具材質やコーティングの検討は実加工試験を中心に実施した。切削シミュレーションの結果は実加工の結果と同一にはならなかったが、傾向をつかむ手段としてはある程度信頼性があり、今回、切削シミュレーションによる検証により初期の段階から最適形状をある程度絞り込むことができたため、開発サイクルの迅速化ができた。

今後はこの工具を実部品の加工へ適用し、高効率加工をしていく予定である。

第4章 インバー材の溶接課題への対応

4-1 研究目的及び目標

航空機部材用CFRPの大型成形型及び三次元形状に対応するためにはインバー材の切断及び溶接を行う必要があることから、材料の接合について、自動溶接機の開発と溶接技術に関しての研究開発を行う。

4-2 概要

シールドガス・溶加材の選定を行い、大型三次元形状の成形型に対応するために曲率形状の溶接条件の確立を目指す。また、自動溶接機の設備を構築し、開先追尾機能による自動溶接を行い、安定した高品位な溶接工程の確立を目指す。

4-3 基礎溶接条件の確立

シールドガス、溶加材の調査を行い、母材と溶加材及びシールドガスの種類を組み合わせた溶接試験を行い、相対評価を行った。

溶接後はX線透過試験や顕微鏡によるマイクロ撮影を行い、ブローホールの量や大きさを確認し、高品位な溶接が可能なシールドガス・溶加材の選定を行い、基礎溶接条件を確立した。

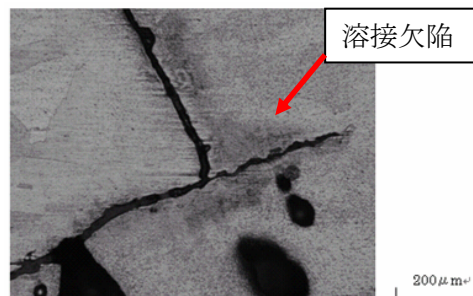


図4-1 ミクロ撮影

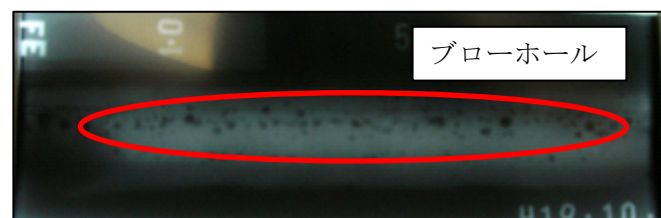


図4-2 X線透過試験結果

4-4 斜面溶接条件の確立

現在想定しているインバー成型型の形状は曲率形状であるため、平面で確立した溶接条件をそのまま様に適用しても斜面部は溶かされた溶加材が流れ出すため融合不良やブローホールが発生し、高品位な溶接を行うことは難しいと考える。

溶接対象ワークを一定速度で回転させ、トーチ角度を直にして常に平面溶接条件を適用する方法も考えられるが、今後増えるであろう航空機部材用CFRP大型成型型の三次元形状に対応するためにも自動溶接機のヘッドを傾ける方法で高品位な溶接を目指す。

曲率形状というのはある短いスパンで考えればある角度を持った直線の組み合わせに近似できるため、平面溶接条件と斜面溶接条件をどのように組み合わせるかが重要である。

①上進溶接

下図のような角度に試験片を固定し、トーチを上方へ進行させる試験を行った。

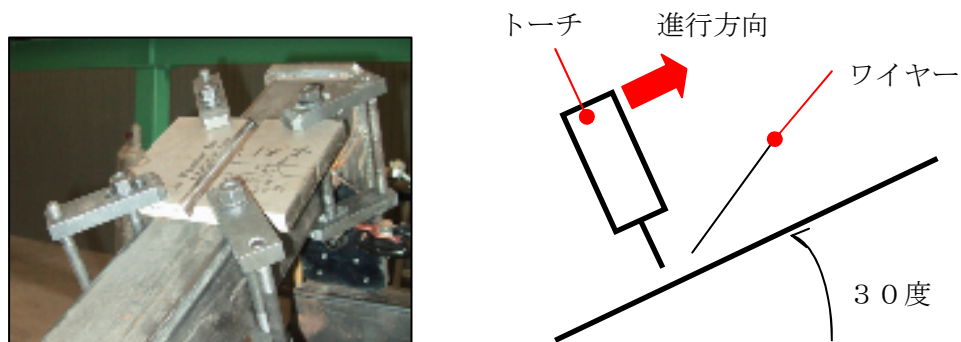


図4-3 上進溶接試験

重力によるビードの垂れが発生し、溶接ビードが団子状態になったが、溶接条件を調整し、図4-4のような安定した良好なビード状態を得ることが出来るようになった。また、X線透過試験結果よりブローホール等の溶接欠陥がないことも確認できた。

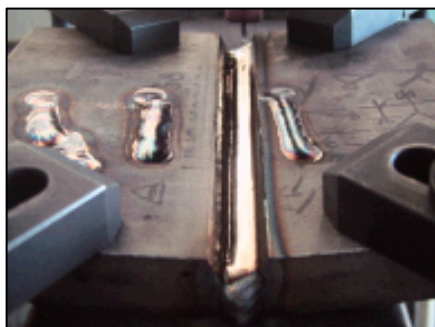


図4-4 上進溶接試験結果

4-5 自動溶接機の開発

機械本体を社内の既存設備であるプラズマ切断機裏側に取り付け、走行軸（X軸）は既存設備を使用するが、他の軸は新設した。金型表面は三次元形状となり、それに合わせてトーチの姿勢を変化させる必要があるため多軸ヘッドを採用した。また、フィラー供給ノズルや開先認識用CCDカメラがワークと干渉する時も姿勢を変化させて回避させる仕様とした。



図4-5 設備全体

CCDカメラで溶接対象ワークのエッジと開先エッジの座標値を抽出することにより、溶接対象ワークのラフセットからの溶接ラインのXY平面ローテーションと開先位置の芯出しを自動で行えるよう調整した。



図4-6 カメラの開先認識

CCDカメラにより開先位置の座標値が抽出され、トーチ先端が溶接開始点に位置決めされる。また、2層目以降はZ方向、X方向のオフセット量をノミナル値で指令し、AVC（オートボルテージコントロール）機能を用いて溶接電圧の検出値と指令値の差を監視し、トーチ軸の傾き方向の高さを自動調節し、安定した高品位の溶接を行えるよう調整した。

4-6 曲率溶接

開発した自動溶接機の機能を用い、ワークセットから溶接までの一連の流れを曲率形状で試験した。溶接対象ワークをラフセットのままでエッジと開先位置の検出を行い、溶接開始点へトーチ先端を移動、かつ溶接方向はX Yローテーションを行い、開先形状に自動追尾しながら溶接することが可能になった。また、溶接条件は形状の傾きに合わせて平面溶接条件・斜面溶接条件を適宜組み合わせ、曲率溶接ができるようになった。



図 4-7 曲率溶接

第5章 全体総括

(1) インバー材及びチタン材の切削加工について、技術的目標値に対する達成度

インバーおよびチタンに関して、今年度の研究により目標値は達成できた。

また実運用に向けた試験も実施し、概ね適用できる目途も立った。

今後は開発した工具の工具長等を実部品アイテム毎に最適化し、実運用に適用していく予定である。

(2) インバー材の溶接加工について、技術的目標値に対する達成度

曲率形状を想定した平面／斜面形状でブローホール等の溶接欠陥のない高品位な溶接をすることが可能になり、さらに長物の形状に適用しても問題ないことが実証された。

また、溶接量／溶接作業のスピードアップについては斜面溶接の条件見直しによるスピードアップを図り、平面／斜面を総合して目標値に達成した。

自動溶接機の追尾機能に関してはカメラの撮影によるワークローテーション／開先位置の芯出し、AVCによる高さ調節機能を使用し、曲率形状を溶接することが可能になった。