

学位(博士)論文

**CFRP の研削加工における
薄肉砥石を用いた冷風供給の効果と
赤外線放射温度計による加工状態
モニタリング**

**Effect of cold air supply with thin-walled grinding wheel
in CFRP grinding and process monitoring
with an infrared thermometer**

指導教員 笹原 弘之 教授

東京農工大学大学院
工学府 機械システム工学専攻

2019 年度入学

学籍番号 19833702

伊藤 幸男

目次

第1章 緒論	1
1.1 社会的背景.....	1
1.2 工業的・工学的背景.....	6
1.3 従来の研究.....	9
1.4 本研究の目的.....	19
1.5 本論文の構成.....	21
第2章 砥石内冷風研削による CFRP の加工面性状と加工特性への影響	23
2.1 はじめに.....	23
2.2 砥石の概要.....	23
2.2.1 砥石の要素.....	23
2.2.2 砥石の仕様.....	23
2.2.3 超砥粒ホイール.....	23
2.2.4 薄肉電着カップ砥石.....	25
2.3 冷風機構.....	26
2.4 マシニングセンタ.....	27
2.5 CFRP の概要.....	28
2.6 加工面温度の測定.....	29
2.6.1 測定原理.....	29
2.6.2 試験片の概要.....	30
2.6.3 測定方法.....	31
2.7 表面粗さの測定方法.....	32
2.8 研削抵抗の測定方法.....	33
2.9 実験方法.....	35
2.10 実験結果.....	37
2.10.1 加工点「温度」.....	37
2.11 加工後「砥石表面」観察.....	39
2.12 加工表面「粗さ」.....	40
2.13 研削「抵抗」.....	42
2.14 「加工面」観察.....	43
2.15 まとめ.....	44
第3章 ノズルの設置条件が冷風の流れに及ぼす影響	47
3.1 はじめに.....	47

3.2 実験条件における流体解析	47
3.2.1 解析条件	47
3.2.2 解析結果	48
3.3 最適な冷風ノズル角度の近似的計算	50
3.4 求めた最適なノズル角度の流体解析による検証	55
3.4.1 解析条件	55
3.4.2 解析結果	55
3.5 まとめ	58
第4章 赤外線放射温度計を用いた研削面の温度測定手法の提案	61
4.1 はじめに	61
4.2 赤外線放射温度計を用いた研削面の温度測定	61
4.2.1 測定原理	61
4.2.2 従来の温度計測手法に対する優位性	62
4.3 黒体炉を用いた動作特性の検証	63
4.3.1 マシニングセンタ	63
4.3.2 赤外線放射温度計の温度測定	64
4.3.3 開口面積と赤外線のセンサへの入射量の関係	64
4.3.4 光路用の小穴付き電着砥石	65
4.3.5 実験方法	66
4.3.6 実験結果	68
4.4 まとめ	71
第5章 赤外線放射温度計を用いた研削面の温度測定手法による CFRP の 研削加工時の異常の検知への適用	73
5.1 はじめに	73
5.2 CFRP と試験片の概要	73
5.3 砥石内冷風供給の温度測定への影響	75
5.3.1 砥石内冷風供給	75
5.3.2 実験手法	76
5.3.3 実験結果	77
5.4 CFRP の端面研削加工時の研削面の温度測定	77
5.4.1 実験方法	77
5.4.2 実験結果	79
5.5 赤外線放射温度計の測温部の位置と測定温度の関係	81
5.5.1 実験方法	81
5.5.2 実験結果	82

5.5.3 研削面表層温度の数値解析	83
5.5.4 実験結果と数値解析結果の比較	84
5.6 熱電対を用いた温度計測手法との比較	94
5.6.1 熱電対の温度測定環境	94
5.6.2 感温部が長球形状の熱電対との比較	95
5.6.2.1 実験方法	95
5.6.2.2 実験結果	98
5.6.3 感温部が薄型形状の熱電対との比較	99
5.6.3.1 実験方法	99
5.6.3.2 実験結果	101
5.7 加工の異常の検知への適用	104
5.7.1 研削抵抗の測定方法	104
5.7.2 実験方法	105
5.8 一般砥石への適用	112
5.8.1 小穴付きビトリファイド砥石	112
5.8.2 ドレッシング	113
5.8.3 実験方法	114
5.8.4 実験結果	115
5.9 まとめ	119
第6章 結論	121
6.1 本論文のまとめ	121
参考文献	127
謝辞	131

第1章

緒論

・1.1 社会的背景

2011年の東日本大震災は、マグニチュード9.0の地震と巨大津波で死者と被害者を合わせて1万9千人を越える犠牲者を生じた。その際、安全の上にも安全に作られた福島第一原発は巨大津波によるメルトダウンと水素爆発により大量の放射能を撒き散らし、地域に甚大な被害を与え科学技術の脆さを露呈して人々に絶望を与えた。

2019年に発生した新型コロナウイルスは爆発的に感染拡大し、世界で504,155,459人、死者:6,197,159人と言われ、今も収束するかは定かでない。医学の限界を思い知らされて2022年もコロナの恐怖と共存する日々は続き、世界の経済は立ち直っていない。

2022年2月24日、ロシアはウクライナ東部で「軍事作戦」を開始すると発表し、国連人権高等弁務官事務所は、侵攻が始まった日から6月11日までに、少なくとも一般市民1892人が死亡したと発表した。連日悲惨な状況がニュースで流れ、物価の高騰、輸出入制限など先の見えない状況になっている。

日本国内の現状は、成長の目安となるユニコーン企業数（企業資産を時価で評価した価値で評価額が10億ドル以上で創業10年以内の未上場企業）は2020年時点でアメリカ約350社強、中国150社強であるのに対し、日本は6社である。政府は「未来投資戦略2018」にて2023年までに20社の創出を掲げ企業のグローバル化と日本経済を牽引するベンチャー企業創出に国を挙げて取り組む姿勢を見せているが、その差は3桁と余りにも大きい。

図1.1に示すように、日本の特許出願件数は、10年連続して減少傾向にあり歯止めがかからない⁽¹⁾。

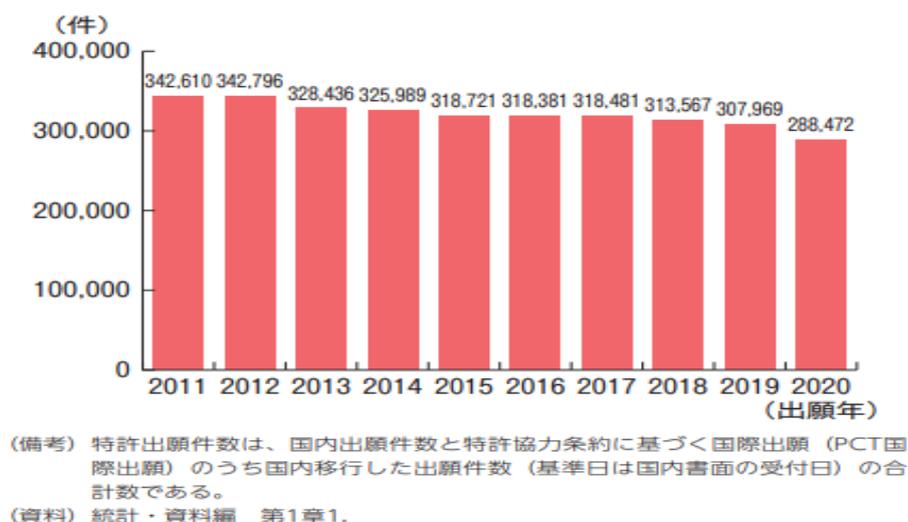


Fig.1.1 Transition of patent applications⁽¹⁾

図 1.2 に 2020 年の国別特許出願件数の割合を示す⁽¹⁾。中国が 25 %，米国 21 %，日本 18 %であり，中国が急増する一方で出願件数と国際間の占める率ともに日本は減少し将来に赤信号が点灯している⁽¹⁾。

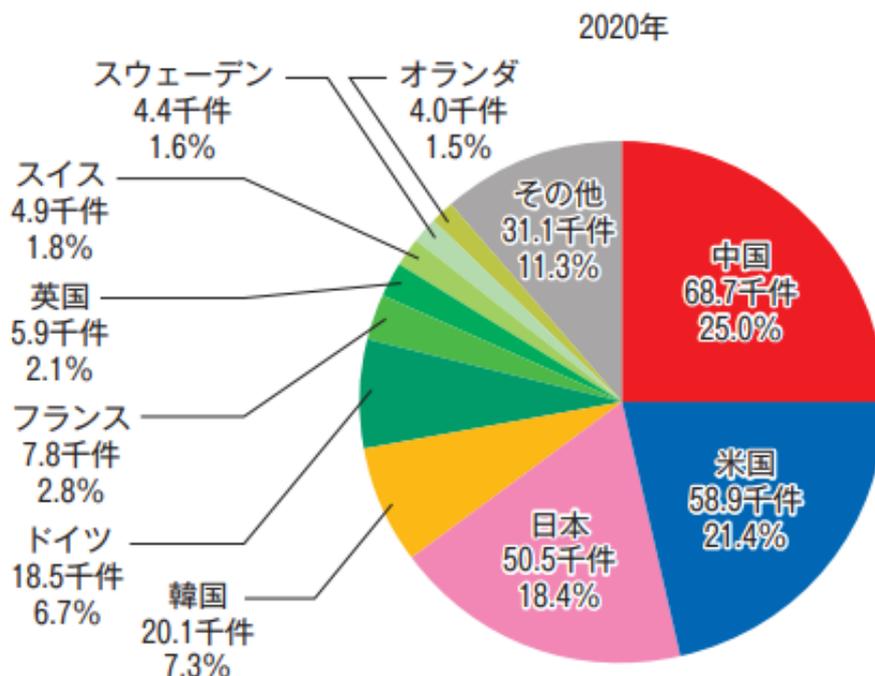


Fig.1.2 Percentage of PTC international applications by country⁽¹⁾

また，図 1.3 に示すように，研究開発投資の各国比率においても，中国の急増と米国 EU の伸び率に比べ，日本の伸びは小さくその差は開く一方となっている⁽²⁾。

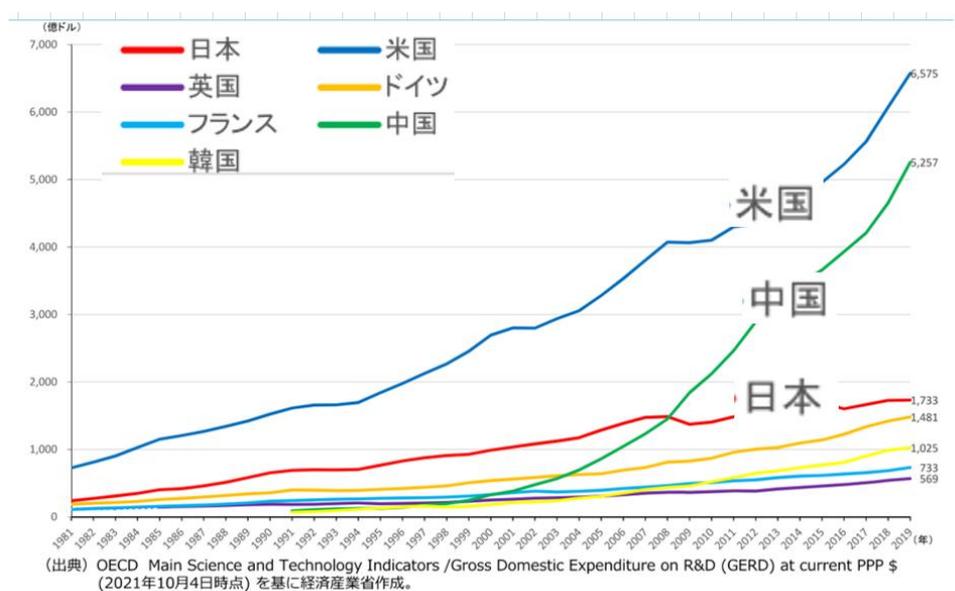
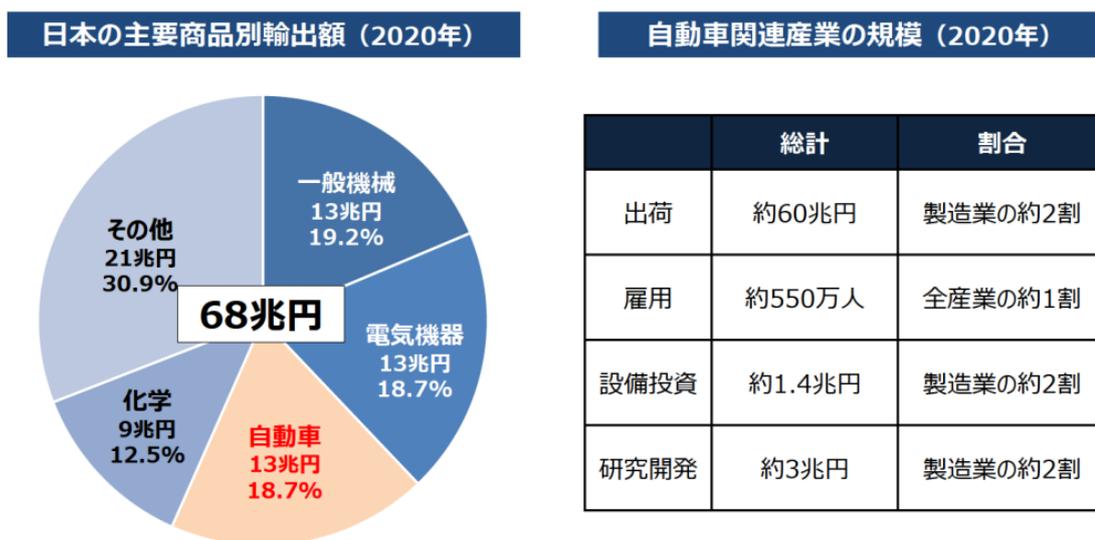


Fig.1.3 Comparison of countries in R&D investment⁽²⁾

2022 経済産業省経済産業政策局・商務情報政策局事務局説明資料⁽³⁾（デジタル技術の現実について）によると、図 1.4 に示すとおり日本はデジタル対応が遅れ、産業全体の国際競争力は大きく低下し自動車の一本足打法となっている中、その自動車もデジタル化（CASE）の大変革を迎えており、図 1.5 に示すとおり我が国産業が直面している現実極めて厳しい。世界時価総額ランキング上位企業トップ 10 中で、1989 年の日本企業は 7 社あったが、2020 年は 0 社で、最高位はトヨタの 36 位となっている。図 1.6 に示す半導体市場の日本企業売り上げ高シェアは、1987 年に 50.3%あったが、2019 年は 10.0%に激減している



Fig.1.4 Top 10 top companies in the world market capitalization ranking ⁽³⁾



(出典) 自工会「日本の自動車工業2021」を基に作成

Fig.1.5 The automobile industry that supports the Japanese economy ⁽³⁾

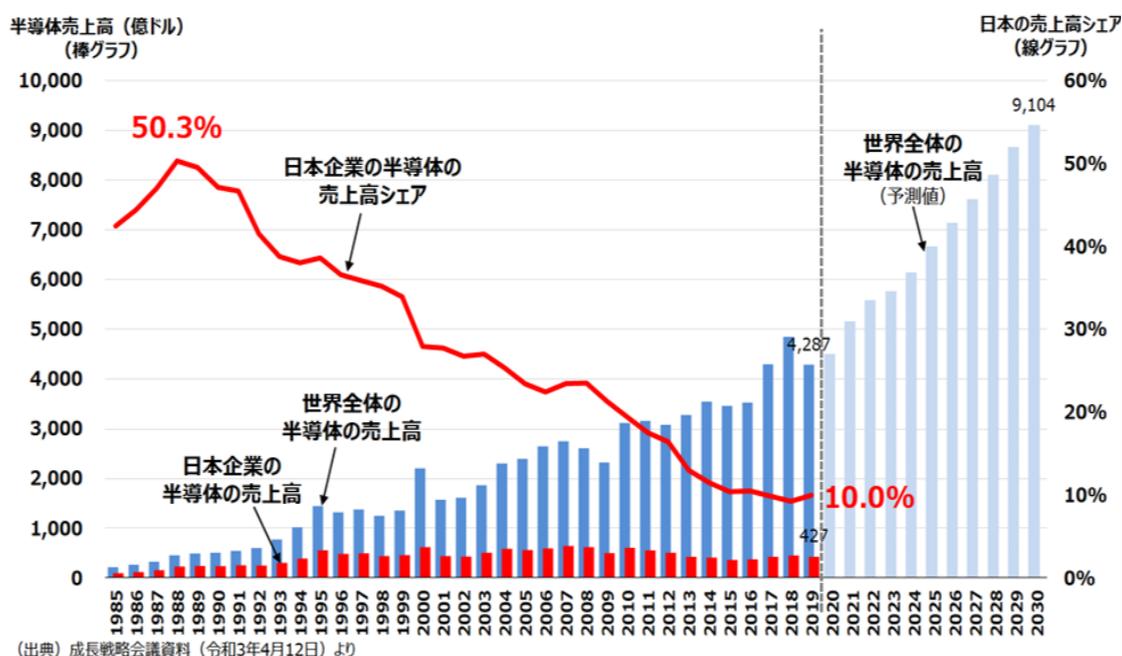


Fig.1.6 Sales share of Japanese companies in the semiconductor market ⁽³⁾

- ① 国全体におけるデジタル投資全体の長期低迷：デジタル投資は経済成長のドライバーであり、デジタル投資の遅れが「失われた30年」の大きな原因と言える。(米国：1994~2018年 デジタル投資3.6倍, GDP2.8倍, 日本：1994~2018年 デジタル投資1.1倍 GDP1.1倍)
- ② 「効率化」中心のデジタル投資：付加価値を生み出すビジネス変革を実現する「本物のDX」が必要。特に、中小企業のDX推進が課題となっている。我が国企業のIT予算の8割が、現行ビジネスの維持と運営費向けとなっている。
- ③ デジタル人材の「量」と「質」の不足：IMD デジタル競争力ランキングは2021では、64ヶ国中で日本は「人材」で47位、「デジタル・技術スキル」で62位となっている。これは我が国企業の約40%の事業会社がデジタル人材の「量」と「質」の「大幅な不足感」を示している。
- ④ 表1.1は、我が国デジタル産業が大きく凋落する中で世界では新たな技術やビジネスやモデルの多くを創出したことを示している。

日本連合（NTT、富士通、NEC、日立）の伸びは、米国、中国とは比較にならない桁違いとなっている。

Table.1.1 Market capitalization of digital industries in the US, China and Japan

	米国(GAFAM)	中国(BAT)	日本 (NTT・富士通・NEC・日立)
1992年の時価総額	300億ドル	0ドル	1100億ドル
2020年の時価総額	7.5兆ドル	1.4兆ドル	1800億ドル

- ⑤ 図 1.7 に示す「デジタル敗戦」：我が国のデジタル産業が大きく凋落する中、世界ではデジタルで新技術・ビジネスモデルが創出となっている。
- ⑥ 国全体におけるデジタル投資の長期低迷：図 1.8 に示すとおり、デジタル投資額と GDP の動きは、ほぼ連動しており国全体におけるデジタル投資の遅れが「失われた 30 年」の大きな原因であり、成長のカギは産業全体で幅広い投資の活性化となっている。

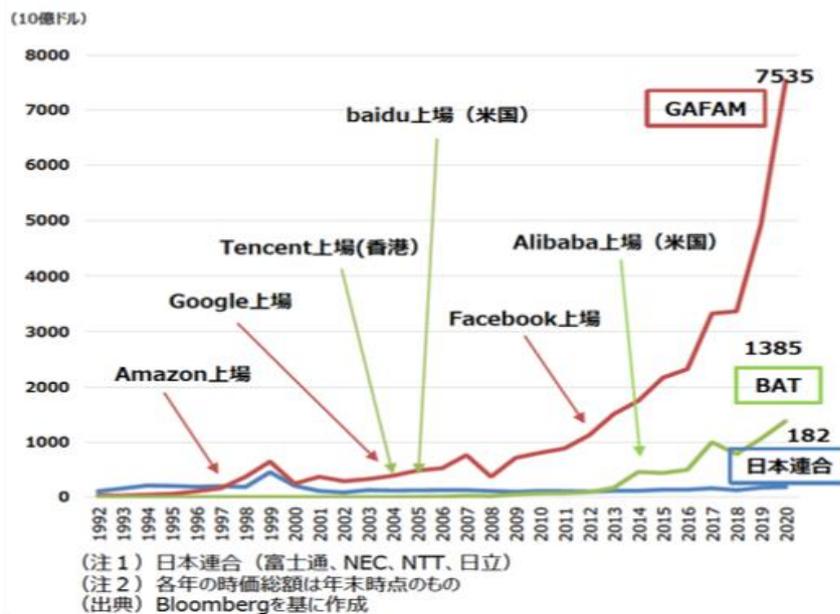


Fig.1.7 Long-term downturn in digital investment ⁽³⁾

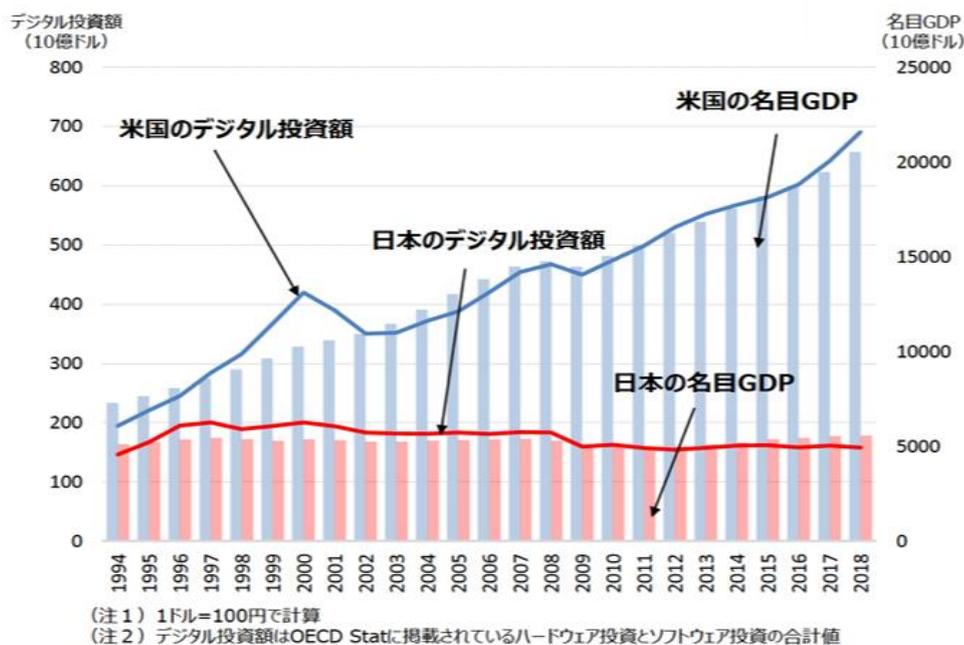


Fig.1.8 Market capitalization trends of major digital industries in Japan, the U S and China ⁽³⁾

これらの中で経済白書が言う最後のチャンスの今、目指すべきものは、古き良き技術は守りつつも積極果敢にデジタルを取り入れ、国際特許が取れる更に一步先を行く超革新技術の開発が重要と考える。

1.2 工業的・工学的背景

炭素繊維強化プラスチック(CFRP)は高比強度・高比弾性率なため、航空・宇宙分野およびスポーツ・レジャー分野など様々な用途に利用されている⁽⁴⁾。特に、構造の軽量化が課題となっている航空・宇宙分野では CFRP の適用が年を追うごとに拡大し、最近では CFRP なくしては機体が成立しない場合が増加している⁽⁵⁾。航空宇宙産業や防衛市場において、各年で 14%の成長を仮定すると、2020 年までに合計 23000 トンの需要が見込まれる⁽⁶⁾。2011 年に就航したボーイング社の次世代中型旅客機 B787 は機体重量の 50%が CFRP で構成され、従来のアルミニウム合金を多用した航空機である B767 と比較すると 20%も燃費が改善されている⁽⁷⁾。さらに、自動車業界においても軽量化による燃費の向上を期待し、車体の構造に CFRP を適用する動きが本格化しており、自動車向けの CFRP の需要量は 2025 年には 85231 トンに増加すると予測されている⁽⁸⁾。その背景として、地球温暖化や大気汚染などの環境問題への対策から、将来的にエンジンの改良や既存の材料による車両の軽量化だけでは達成できないレベルまで各国の排出ガス規制値が引き上げられる可能性が高くなっていることが挙げられる⁽⁹⁾。

帝人株式会社は、CFRP を使った複合材料集成材「LIVELY WOOD」を 2023 年 3 月を目途に国土交通省が定める指定建築材料への適合を目指しており、集成材の使用に必要な煩雑な手続きをなくし、建築材適用を現在の数千万円規模の売り上げを 10 億円まで上げると報道している。天然木材と CFRP を組合せ、木材の軽さや温もりを生かしつつ木材強度を 2 倍に向上し、従来難しかった横への張り出しや天井を高くし、また支えの柱の数を最小限に抑えた開放的な空間が可能となる。将来は 100 億円規模に育てると言う⁽¹⁰⁾。

一般的に熱硬化性樹脂マトリクス品は「CFRP」と呼ばれ、母材の樹脂はエポキシ、ポリエステル、フェノールなどがあり、熱可塑性マトリクス品は「CFRTP」と呼ばれ、母材樹脂はポリアミド、ポリプロピレン、ポリフェニレンなどがある。CFRP (熱硬化性)は、塑性変形しないので曲げることが出来ないため限界を超えると脆性破壊し又、溶接が出来ないので「接着」かボルト、リベットなどで「機械的結合」か「併用」が望ましい⁽¹¹⁾。

機械加工の際に用いる工具材料は超硬、ダイヤモンドが基本であり、エポキシ樹脂は吸湿するのでエマルジョン切削液を使い乾燥処理するか、切削液を使わないドライ加工が望ましい⁽¹¹⁾。

例えば航空機用エポキシ系 CFRP 東邦テナックス商品名「ベスファイド」プリプレグの良好な耐熱性 (ガラス転移温度 Tg) は 168°C とある⁽¹²⁾。

いずれにしても CFRP は、スチールに比べ軽く強いが熱に弱い特徴を持つため、特に研削熱にはリアルで且つタイムリーな温度管理と加工条件へフィードバックが必要といえる。

今後さらに CFRP の適用範囲を広げていくためには、曲面を持つ複雑な形状の部品を製

作ることが必要となる。しかし、最も信頼性の高い成型方法として用いられているオートクレーブ成形法では、成型後の端面部に素材の余剰部分ができるため、これを除去する機械加工が必要となる⁽¹³⁾。

CFRPの端面仕上げ加工にはアブレイシブウォータージェットによる加工やエンドミルによる切削加工が一般的である。しかし、前者は加工可能な形状に制約があることや、設備が高価であるという問題がある。一方後者はバリや毛羽立ち、剥離による加工精度低下や^{(14)~(16)}、激しい工具摩耗^{(17)~(18)}などの問題がある。そこでCFRPの高品位加工に対して、高精度な加工が可能である研削加工への期待が集まっている。ただし、一般にCFRPの研削加工には過大な研削熱の発生や砥石の目づまりが問題となる。

金属部品の除去加工において、代表的なものに切削加工や研削加工がある。その中で、高い寸法精度や形状精度が求められる場合、研削加工を用いることが有効である。研削加工とは、無数の微小な切れ刃を有する砥石という工具を用いた加工方法であり、円盤状の砥石を高速回転させ被削材に接触させることで加工を行う^{(19)~(20)}。切削加工と比較すると除去能率は劣るが、 $0.5\sim 2\ \mu\text{m}$ 程度の高い寸法精度や形状精度、また高い仕上げ面粗さを得られることから、平面形状や円筒形状の製品を中心に精密仕上げに用いられることが多い。砥石には円盤形状の円周上に無数の微小な砥粒が存在し、その一つ一つを切れ刃と見なすことができ、超硬合金をはじめとする硬質材料から、セラミックスなどの脆性材料、硬質ゴムなどの比較的軟質の材料、そして炭素繊維強化プラスチック(CFRP)などの複合材料まで、幅広く加工することができる。

図1.9に示すように、砥石の砥粒切れ刃はすくい角が負(約 $-60^\circ\sim -80^\circ$)⁽²¹⁾であることから、切削加工に比べて切れ味は劣る。また研削初期に逃げ面摩耗が発生するにもかかわらず、砥粒の切込みは極めて小さいため、工作物の表面を弾性的・塑性的に上滑りする切れ刃が多い。このため比研削抵抗(砥粒切削断面あたりの接線研削抵抗)は比切削抵抗(切断断面あたりの切削主分力)の数十倍に達する。さらに砥石周速度は通常切削速度の数十倍であることから、大きな加工熱が発生する⁽²²⁾。

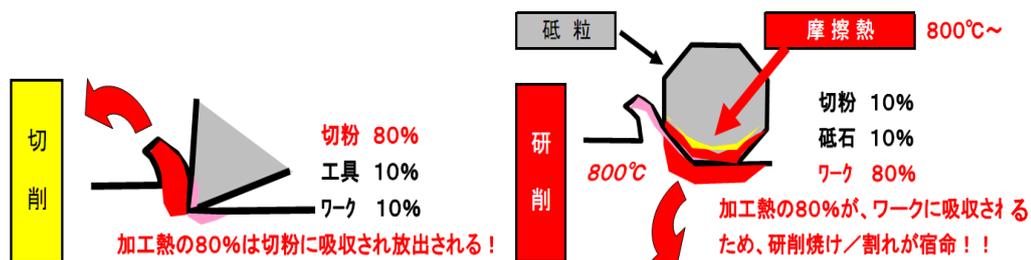


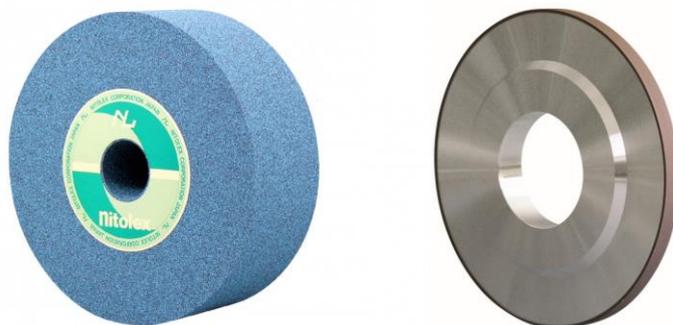
Fig.1.9 Characteristics of processing heat for cutting and grinding

一般的な条件として、切削加工は加工熱の80%が切りくずとして排出され被削材に伝わるのは10%だが、研削加工では80%が被削材に伝わる。研削加工によって発生した熱が被削材に蓄積することで発生する研削焼けは、被削材の組織変質、焼け、割れ、軟化、残留応力、砥石の摩耗、加工精度の悪化を引き起こす。

また、その多くの発見（検査）方法は、被削材を切断した面の組織観察のみで得られることから、工法凍結で保障し、現品確認又は抜きとりサンプルの切断検査と非破壊検査が一般的である。

加工中の砥石表面は砥粒の摩耗と脱落による自生作用の繰り返しによって、時々刻々と状態は変化している。研削条件が厳しいと過大な熱が発生し、研削焼けによる工作物の変質、熱変形による寸法・形状精度の低下、加工表層面に引張残留応力の発生などが生じる恐れがある。研削加工は機械加工において、精密仕上げに用いられることが多いため、こうした発熱による工作物の損傷や変形に対して十分に注意する必要がある。研削状態は砥石の種類や被削材など様々な要因で相互に影響を受けるため、適切な研削条件の選定は困難とされる。1983年のCIRP(International Academy for Production Engineering)総会においてR. L. Keggは「研削加工はこれまで多くの研究がなされてはいるが、依然として”black art”である」と苦言を呈した⁽²³⁾。すなわち、要求される加工結果を達成するための加工条件の設定は技能者のスキルに依存せざるを得ないことを指摘している。特に少ロット生産においては、適切な加工条件を設定するために要する時間が極めて大きな割合を占めている。熟練技能者が減少している現代の社会環境では、センサや計算機を利用した研削プロセスの高度な監視によって技能者への依存度を低減することが求められている⁽²⁴⁾。

アルミナ系、炭化ケイ素系の砥石を一般砥石または在来砥石と言い、ダイヤモンド、CBNを超砥粒砥石と呼ぶ。図1.10に、ビトリファイド砥石とダイヤモンド電着砥石の外観を示す。



(a) Vitrified grinding wheel (b) Electrodeposited grinding wheel

Fig. 1.10 Grinding wheel ⁽²⁵⁾

超砥粒砥石は粒径が小さいので仕上げ面粗さが向上し、破壊強度が高いので高い周速に耐えられるため加工能率が向上する。

工作機械の初期段階は、旋削は旋盤、フライス削りはフライス盤、穴あけはボール盤、研削は研削盤と其々が独立して進化してきた。その結果、工作機械毎に人手で被削材を脱着しながら機械間を渡り歩く工程となっていた。近年の複合機（マシニングセンタ）の登場により、1度取付けた被削材は旋削加工、フライス加工、穴あけ、研削までが可能となり、被削材の脱着回数に比例した精度の累積悪化もなく、脱着の人手が不要となって無人

自動化，24時間稼働化が進んだ。

また，自動工具交換装置ATC（Automatic Tool Changer）の普及で，数百本の工具を装着したマガジンから寿命交換，異なる工程の工具の任意交換がNCプログラム指令で容易に可能となった。更に工具回転軸は1万回転以上の高速型が普及し砥石の必要周速回転が可能となり，従来は無理であった外径100 mm以下砥石の研削加工も可能となっている。

また，近年の製造業は，ハード的なものづくり技術に依存する時代から，さまざまな情報を有効に利用し，短いリードタイムで要求の製品を低コストで提供できるか否かが問われるデジタル時代となった。加工情報をインプロセスでリアルタイムに収集し，得られたビックデータから有効なものを分別し，分析した上で製造にフィードバックして適時最適な加工条件の設定が最重要課題となっている。

1.3 従来の研究

CFRP の研削加工にはダイヤモンドや CBN などの超砥粒を電着した砥石が有効であることが報告されている。Sein ら⁽²⁶⁾はダイヤモンドおよび CBN 砥粒を電着した小径工具を用いて CFRP のルータ加工を行った。その結果，ダイヤモンド砥粒電着工具の方が CBN 工具より研削抵抗が低くなることを示した。加えて，ダイヤモンド砥粒電着工具の方が工具摩耗，加工面品位の点で有利であることを示した。

Jamal ら⁽²⁷⁾は小径のダイヤモンド砥粒電着工具を用いて CFRP 板材のトリム加工を行った。その結果，高切削速度かつ低切込みの場合に，研削抵抗が低くなり，研削温度も抑制され，良好な加工面品位を得ることを示した。

研削液の影響については，大橋ら⁽²⁸⁾は研削雰囲気を乾式，湿式，液体窒素を供給するという3つに変化させて CFRP の端面研削を行い，それぞれの加工雰囲気の表面粗さ，加工温度および材料強度への影響を調査した。その結果，液体窒素を供給する場合，CFRP の硬さが増大し必要な研削エネルギーが増大するため，乾式より研削抵抗，加工点温度が大きくなることを明らかにした。

また，大森⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾らは必要最低限の温度の冷風を外部から供給する準冷風供給システムを用いて SCM440 の平面研削を行った。その結果，冷風研削は冷風が連れ周り空気層と同相であり混ざりやすいため湿式に比べ研削点に安定して冷却することができ，砥粒の熱衝撃を抑制し，砥石摩耗が抑制されることを明らかにした。また小型冷風装置を用いて SCM440 の平面研削を行った結果，外部から冷風を供給することによって溶着型目づまりや砥石磨耗を抑制し，乾式加工に比べ，仕上げ面粗さと砥石寿命向上効果があることを明らかにした。

本研究室では，八尾ら⁽³¹⁾が開発した図 1.11 の砥石内研削液供給機構を用いて研削加工を行った。その結果，外部からノズルにより研削液を供給する方法に比べて砥石と研削面のスペースが狭小で研削液の加工面到達が困難な特に内接円，深穴内径等では砥石回転中心から外縁へ砥石内を液圧と遠心力で研削液が直接研削面に噴出し砥石及び加工面を冷却して良好な加工面性状が得られること，砥石の目づまりの抑制および研削温度の低減が可能

で原理的に優位な機構を液冷で明らかにしたが、冷風と CFRP の加工は行っていない。

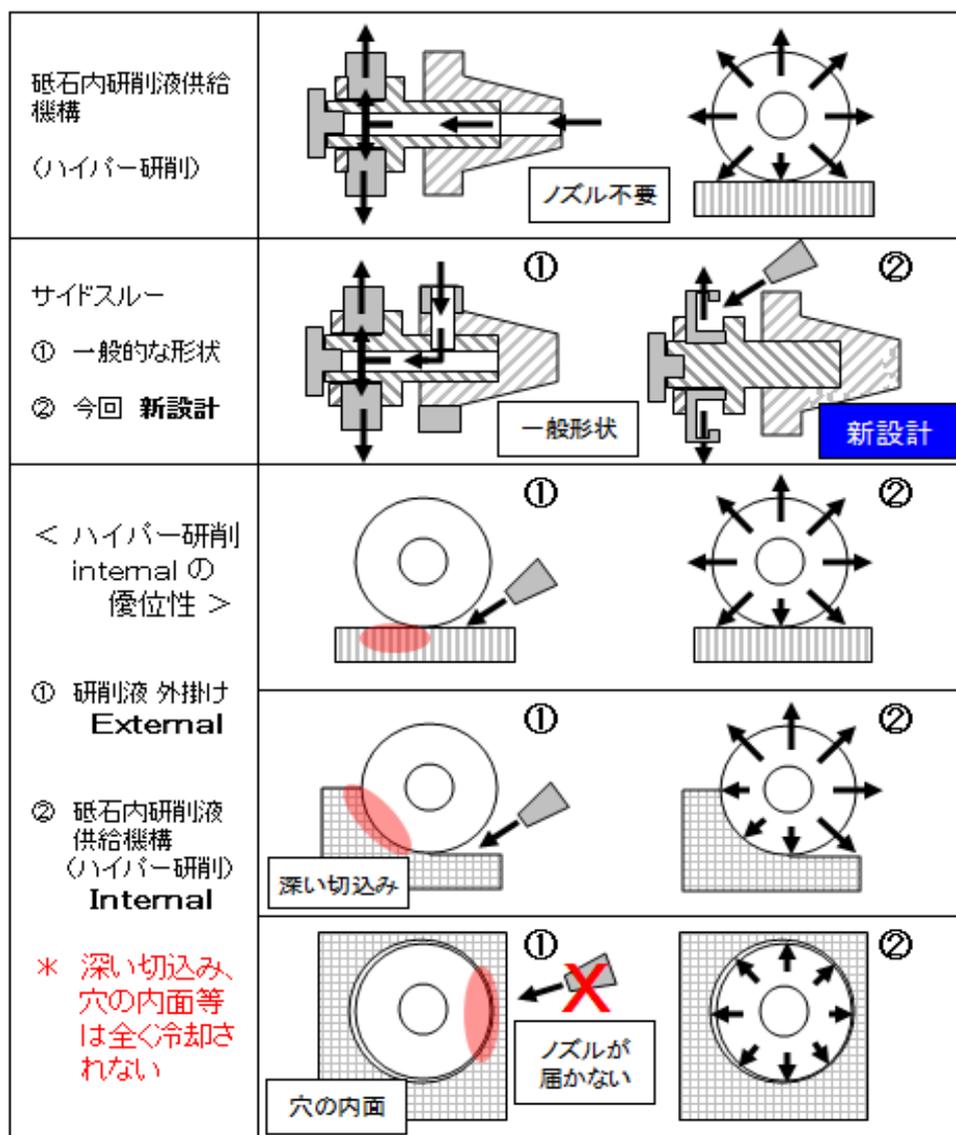


Fig.1.11 Grinding liquid supply mechanism in the grindstone

他方、研削加工における研削状態のインプロセスモニタリングに関する研究は、これまでに様々な研究がされている。

小尾らは⁽³²⁾、図 1.12 に示すように、渦電流計を金属検出器として応用し、砥石表面上に付着した目づまりをインプロセスで検出可能であることを明らかにした。研削砥石は電気的に不導体物質により形成され、一方、被削材は良導体材質がほとんどである。この性質を利用し、非接触型の金属検出器である渦電流計によって、目づまりにより研削砥石表面の被覆された面積をインプロセスで測定可能であることを示した。また本手法の検出感度は非常に高く、広範囲の測定レンジを持ち、砥石と接触することなく、また粒子分解能、応答速度も十分であることから、目づまりを定量的にインプロセスで測定可能な手法として有効であることを示した。

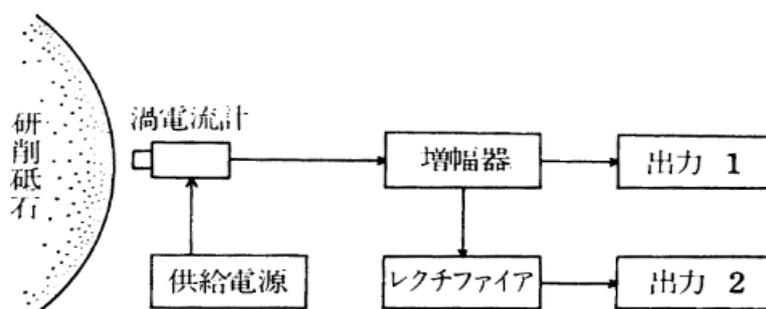


Fig.1.12 In-process measuring method of metal loading using eddy current sensor⁽³²⁾

須藤らは⁽³³⁾、図 1.13 に示すように、光電子増倍管を用いることで砥粒の摩耗をインプロセス測定可能であることを明らかにした。顕微鏡の光源からの光を一定速度で動く砥石作業面に照射すると、砥粒切れ刃の摩耗面からのみ強い反射光を得られる。本手法は、砥粒からの反射光をスリットを介して光電子増倍管に導き、得られた光電出力波形の時間長さから個々の切れ刃の摩耗面長さをインプロセス測定可能である。

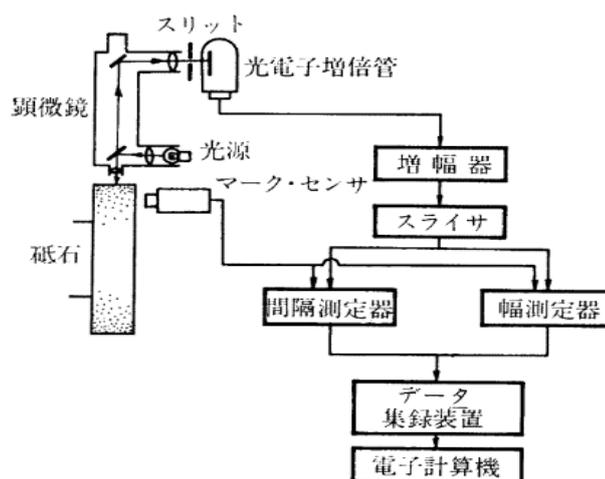


Fig.1.13 In-process measurement of wear of abrasive grains using photomultiplier⁽³³⁾

坂本らにより⁽³⁴⁾⁻⁽³⁷⁾、研削状態の評価対象を限定せず、各種研削状態の変化を同一の評価方法及び装置で可能にすることを目的とし、図 1.14 に示すようなレーザ変位計を用いた砥石作業面プロファイルのオンマシン測定システムを開発したことが報告されている。本システムによって、研削に伴う各種作業面状態変化に対応したプロファイル変化をとらえられることを明らかにした。また作業面プロファイルの凹凸高さの相対度数分布に基づいて目つぶれ、目づまり、目こぼれの発生を定性的にとらえることを可能にした。さらに、目つぶれ、堆積型目づまり、溶着型目づまり、目こぼれに分けて評価するため新たな相対度数分布を提案し、複合的な作業面状態変化を典型的変化に分けて評価可能であることを示した。

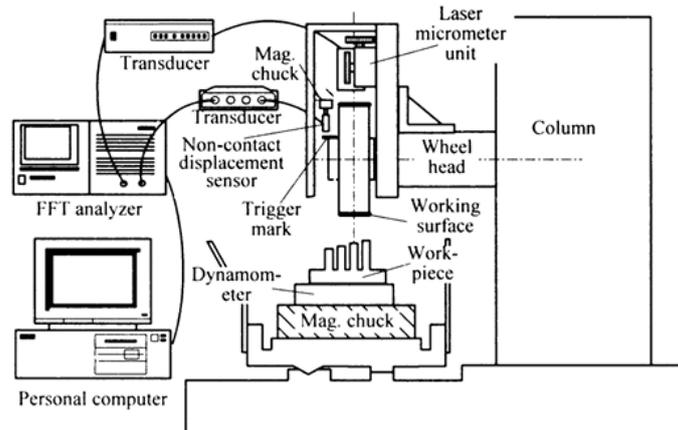


Fig.1.14 Setup for on-machine measurement of working surface profile⁽³⁶⁾

しかし、これらの研究においては、研削加工において重要課題である発熱に関する評価はされていない。研削加工の加工温度に関する研究も様々な手法で行われている。

大森らは⁽³⁸⁾、研削メカニズムを解明することを目的とし、平面研削において研削点温度及び被削材内部の温度分布の測定を行った。図 1.15 に示すように、研削点温度において、被削材内部に被削材と絶縁したコンスタンタン線を埋め込み、コンスタンタン線上を研削する瞬間に工作物-コンスタンタン熱電対が形成される原理を利用し、研削点温度の測定を行った。また、図 1.16 に示すように被削材内部の温度分布において、被削材底面から深さの異なる穴をあけ K 型熱電対を設置し、被削材表面から深さの異なる温度を測定し、被削材内部の温度分布測定を行った。

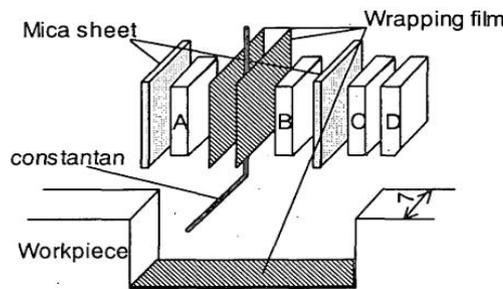


Fig.1.15 Structure of the sensor to measure temperature at grinding point⁽³⁸⁾

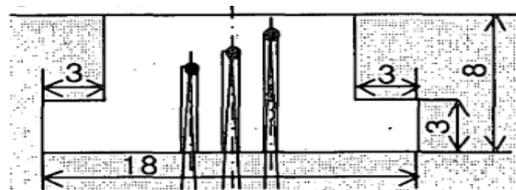


Fig.1.16 Structure of the sensor to measure temperature distribution of workpiece⁽³⁸⁾

A. D. Batako や A. Lefebvre らにより⁽³⁹⁾⁻⁽⁴¹⁾、熱電対を用いた温度測定について報告されている。図 1.17, 1.18 に示すように、熱電対の接点に着目し、被削材に熱電対を埋め込み加工面付近の温度を測定する方法と、被削材と熱電対で接点を設ける方法とで比較を行った。

また、熱電対による温度測定を元に、被削材と砥石との接触弧内の温度変化についてシュミレーション・解析を行った。

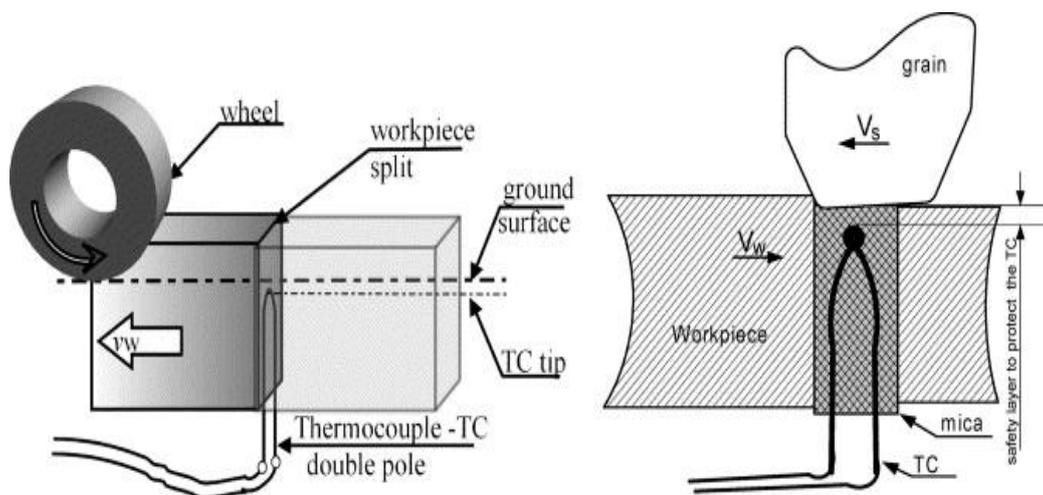


Fig.1.17 Double pole TC configuration for surface grinding⁽³⁹⁾

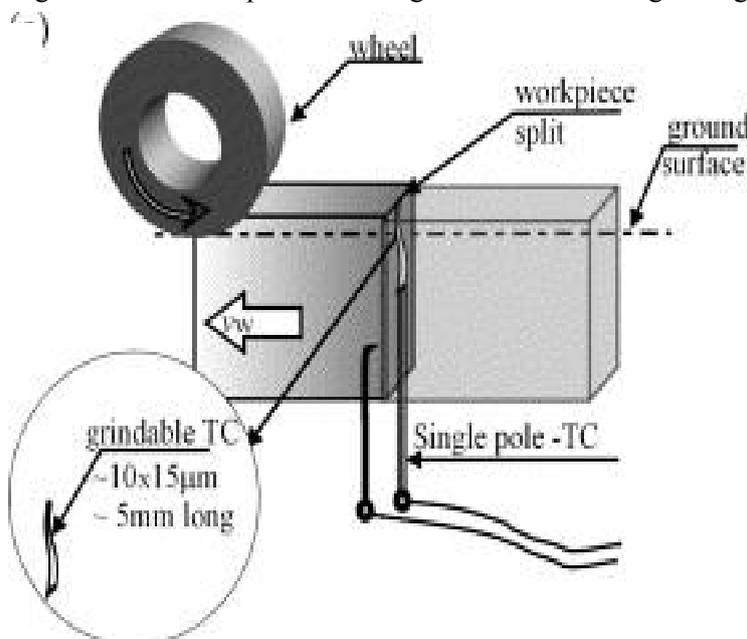
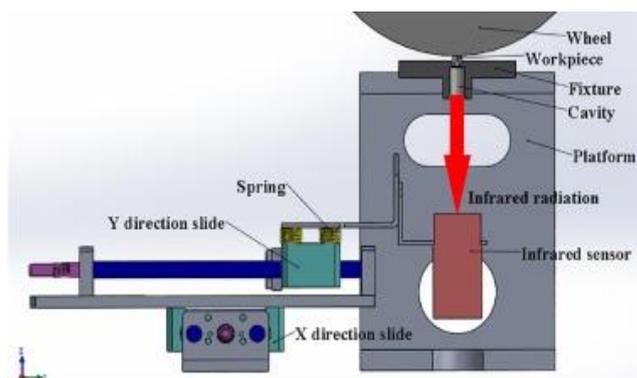
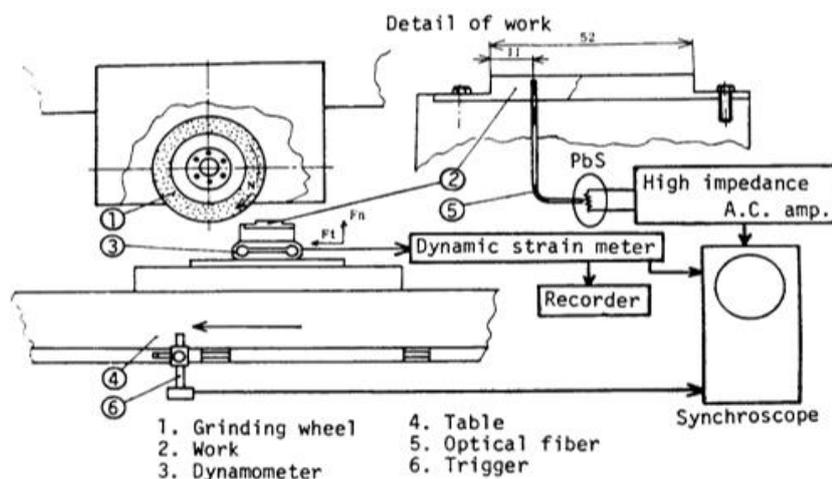


Fig.1.18 Single pole TC configuration in split workpiece⁽³⁹⁾

熱電対以外の温度測定方法として、赤外線センサを使用した例も報告されている。Dehao Liu らは⁽⁴²⁾、クリープフィード研削中の被削材の温度を測定するために、図 1.19 に示すような赤外線センサを用いて加工点裏側の温度を測定する方法を提案した。そして被削材に熱電対を埋め込む温度測定方法との比較を行い、赤外線センサを用いた提案手法は機械的振動やノイズの影響をほとんど受けずに温度測定が可能であることを明らかにした。

Fig.1.19 Concept of in-situ infrared measuring method⁽⁴²⁾

上田らは⁽⁴³⁾⁻⁽⁴⁴⁾, InAs(ヒ化インジウム)セルと光ファイバを組み合わせた赤外線輻射温度計を作製し, 熱電対を用いた手法と研削面の温度測定結果の比較を行った. 図 1.20 に示すように, 加工物の底面から研削表層近傍まであけた小孔に光ファイバを挿入し, 小孔の底部に接する位置で固定した受光面で輻射される赤外線を受光し, 加工物表層の温度を測定する. S55C のドライ研削加工において 2 つの温度測定手法を比較した結果, 熱電対による手法では感温部が大きく応答速度が十分でなかったことから, パルス幅が高速(数 10 μ s)である砥粒切れ刃による熱パルスが波形に現れず, 研削面の温度変化に追従できなかった. 一方, 赤外線輻射温度計による手法は応答速度が高いため, 熱パルスが多い出力波形で得られ, 研削面の急峻な温度変化に対しても追従可能であることを示した.

Fig.1.20 Measurement of grinding temperature by infrared radiation pyrometer with optical fiber⁽⁴³⁾

E. Brinksmeier らは⁽⁴⁵⁾, 図 1.21 に示すようなセグメント砥石に薄膜熱電対と力センサを埋め込んだ統合モニタリングシステムを開発した. 本手法は粗研削, 精研削, 仕上げ研削, スパークアウトにおける温度と力の変化をモニタリングすることが可能であることを示した.

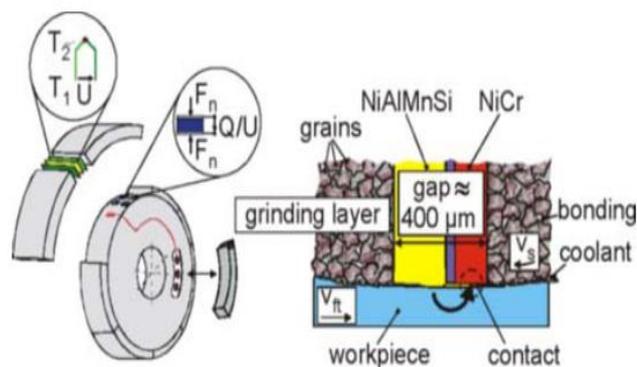


Fig.1.21 Integration of a thin film thermocouple and force sensors in the grinding wheel⁽⁴⁵⁾

福原らは⁽⁴⁶⁾、目こぼれ、目づまり、目つぶれのような研削加工時の異常をインプロセスで判別するために、図 1.22,1.23 に示すような砥石内に熱電対を埋め込み加工中の砥石表面温度をモニタリングする手法を開発した。その結果、研削点の温度をリアルタイムでモニタリングできることに成功し、得られたデータから加工中の砥石表面の状態を連続的に判別することが可能であることを示した。

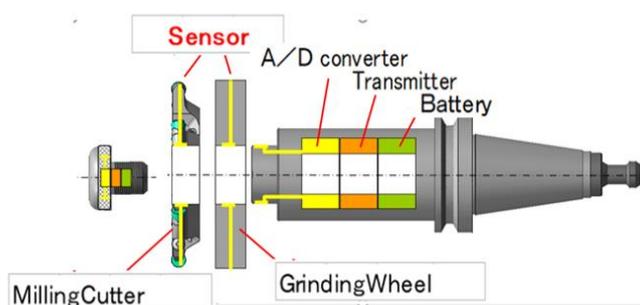


Fig.1.22 Tool smart holder with built-in sensor

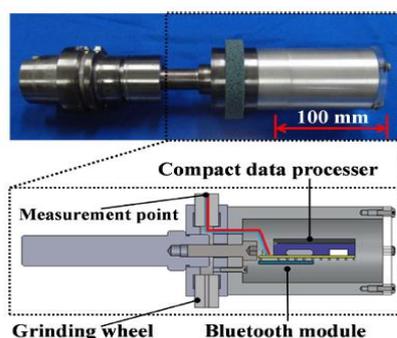


Fig.1.23 Monitoring wheel for machining state⁽⁴⁶⁾

松原隆太郎（平和産業株式会社）他 4 名（伊藤幸男，松原成希，松原光作，日下部篤史）は、空缶の外周面に超砥粒電着し薄肉電着砥石として研削面の小穴又は細溝から冷風、冷水を砥石内から加工面に直接供給しクーラントノズルが不要で且つ砥石内空間にセンサー

(熱センサ, 振動センサ等) と受発信器, 電源及び演算装置を内蔵して加工点をオンマシン, リアルタイム, インプロセスでモニタリングする方式と製造法を平成31年(2019)3月24日に「空缶型円筒研削砥石とこの研削装置及び空缶型円筒体の製造法」と題して特許を申請した. 図1.24に概要を示す. ①ツナ缶の空缶に, ②超砥粒電着しており, ③その砥石の重量は23gで, 類似形状の一般的な超砥粒電着砥石が276gであるのに対して1/10以下と軽く, ④空缶の空間には市販の赤外線放射温度計が余裕で内蔵できる. そしてその温度計測と撮像の可能性を, 図1.25で示す赤外線放射温度計の要素試験で, ⑤黒体炉から発する赤外線を4500rpmで回転する空缶砥石の4か所Φ10mmの穴と穴を通過して赤外線温度計測することが可能であることを示した. 図1.26で示すハイスピードカメラで要素試験した結果, ⑥加工面に見立てた粗さゲージの面が撮影できたと発表した. しかし, CFRPを研削した加工面の確認はしていない. この発明を発展させ, CFRPへの適用を目指すのが本論文の研究である.



Fig.1.24 Features of the patent-pending empty can-shaped whetstone



Fig.1.25 Infrared thermometer test

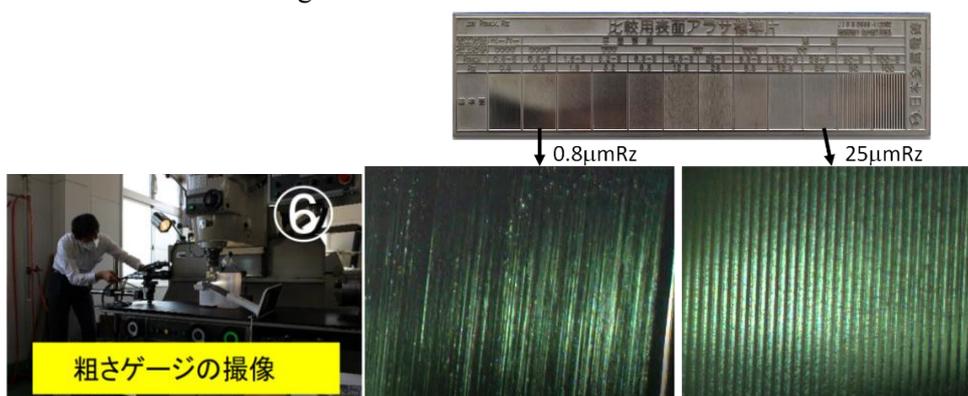


Fig.1.26 High-speed camera shooting test

そして, 金属薄肉カップ砥石の効用と発明以来200年以上経過したゼーベック熱電対に代わるデジタルチックで進化著しい温度センサーの赤外線放射温度計等を用いた新しい研削面の温度測定を図1.27で示す提案をし, 加工中の研削面と砥石表面の温度をリアルタイム・インプロセス計測が可能であることを示したが実加工への適用可能性は明でない.

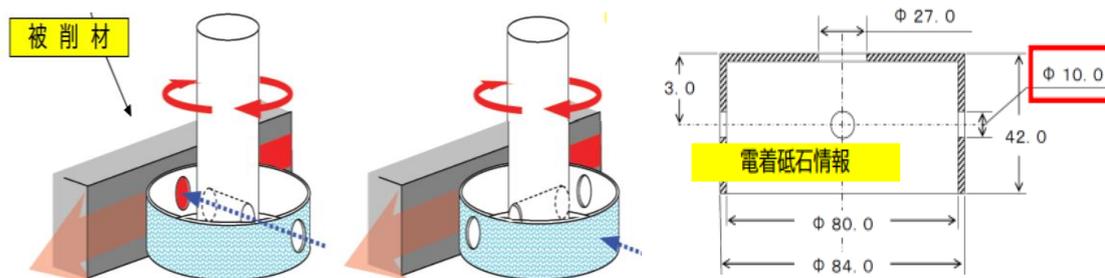


Fig.1.27 Empty can shape grindstone and processing point Direct temperature measurement method

空缶形状の超砥粒金属薄肉砥石では、以下のような事項が課題と考えられる。

01, 薄肉の最終想定厚み

プレス又はへら絞りが可能で軽量の 2mm 前後の安価な鋼材を想定しているが、適正な値は検討する必要がある。

02, 製造法コスト

削りだし工法に比べて板金プレス又はへら絞り工法は大幅にコストダウンが可能と想定されるが、具体的な値は未確認である。

03, 柔構造のカップ砥石が持つ衝撃吸収効果

衝撃に弱いダイヤモンド砥粒の寿命延長の可能性は検討する必要がある。

04, カップ形状のバリエーション

下方向解放型で実験したのみであり、図 1.28 に示すような上方向解放型と密閉型については未確認である。

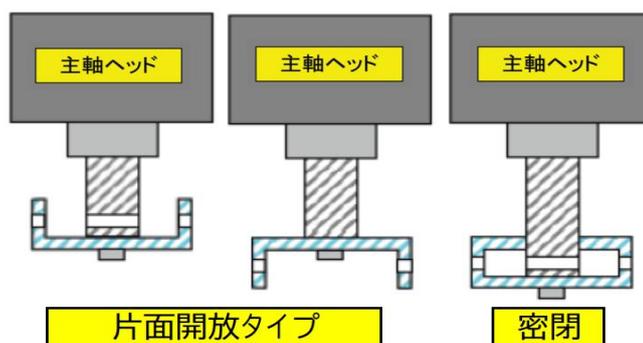


Fig.1.28 How to install an empty can-shaped whetstone

また、赤外線放射温度計によるリアルタイム・インプロセス温度計測では以下のような課題がある。

01, フライス面加工・研削面加工

研削だけでなく、図 1.29 によるフライス加工等の面削り計測を想定しているが、適用可能性は未確認である。

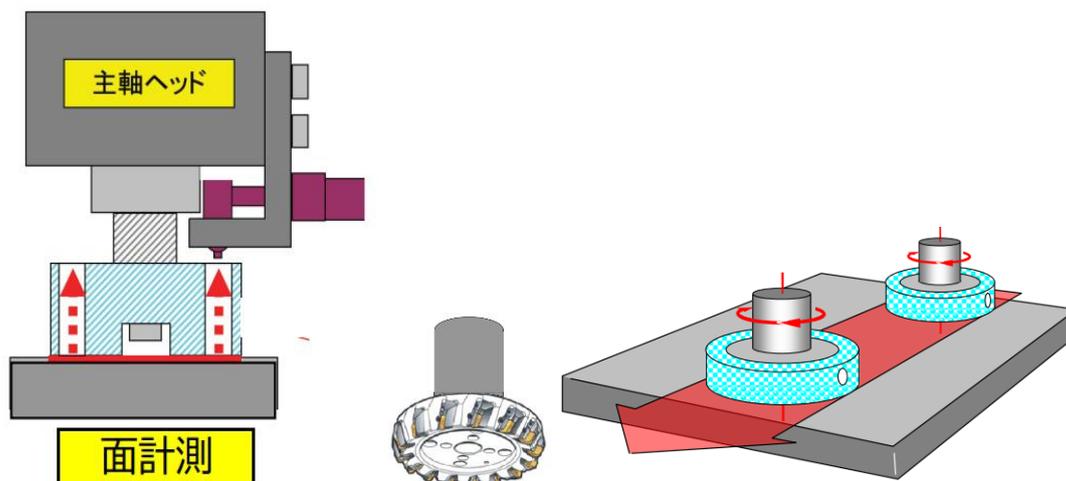


Fig.1.29 Measurement of milled infrared radiation thermometer

02, センサーの外付けと内蔵タイプ

図 1.30 に示すように、外付けタイプについては実験したが、内蔵タイプについては今後の検討課題である。

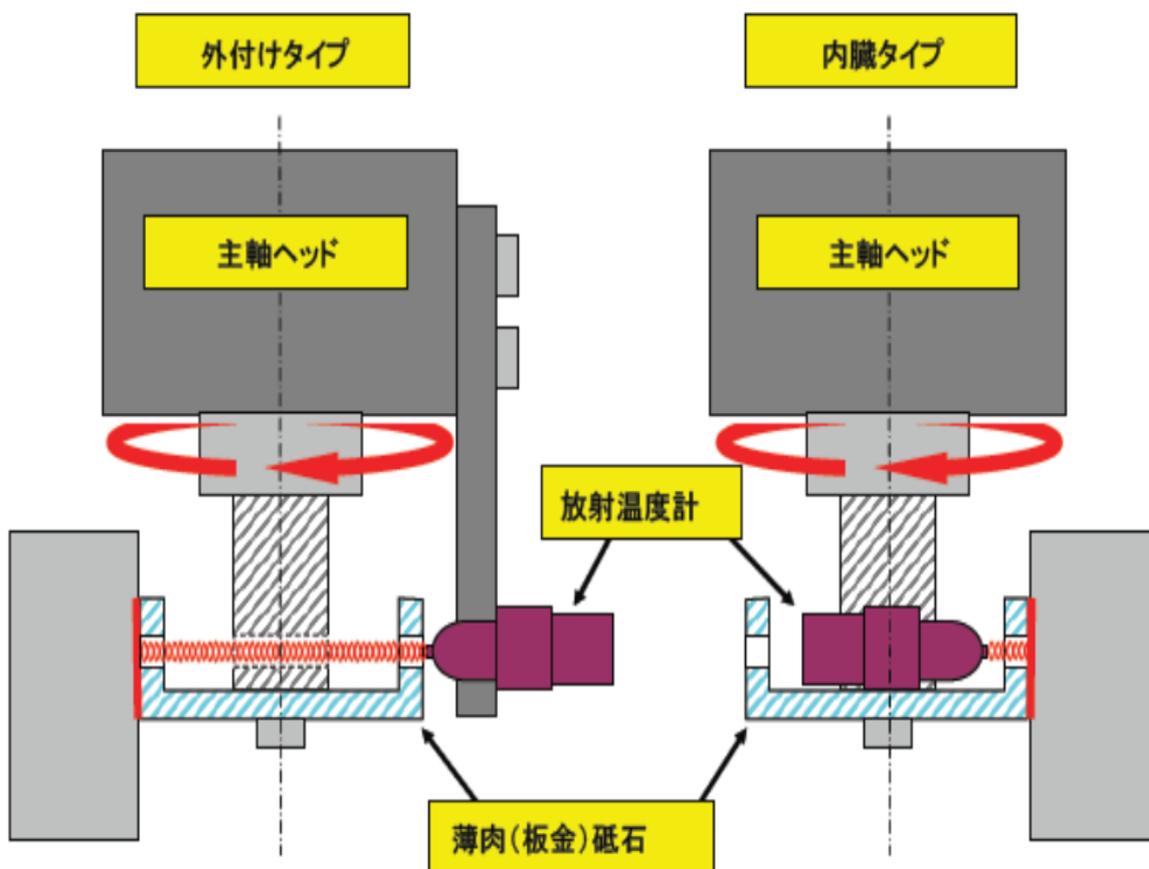


Fig.1.30 External and internal infrared thermometer

03, 図 1.31 に示す, 黒体炉の計測確認はしたが CFRP 加工面での実証実験はしていない.

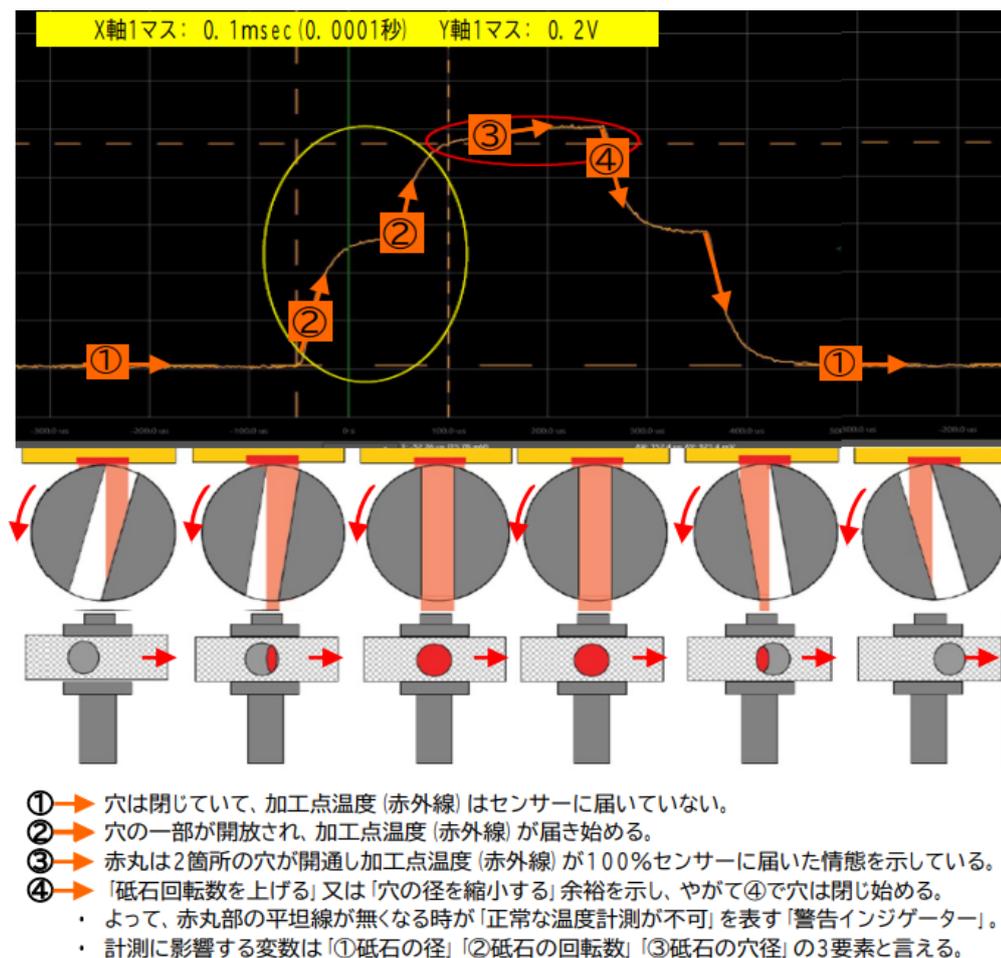


Fig.1.31 Infrared thermometer test result of blackbody furnace

04, 複数センサーの同時計測を想定しているが確認していない.

図 1.32 に示すように, 赤外線放射温度計, レーザ変位計, ハイスピードカメラ単独の外付け計測は確認されているが, 同時計測については未実施である.

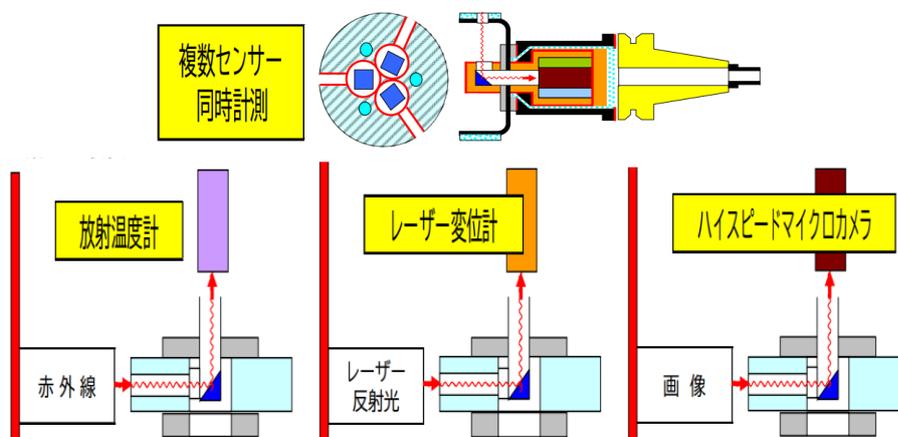


Fig.1.32 Simultaneous measurement of multiple sensors

05, 工作機械工具回転軸へ内蔵する方法

図 1.33 で示す方法を想定しているが, 確認していない.

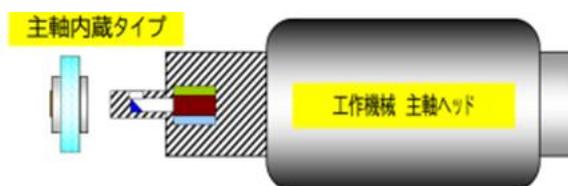


Fig.1.33 Method to be built into the spindle of the machining center

06, ワイヤレスで計測結果を発信する方法

確認していない.

07, 超砥粒の種類

ダイヤモンドの他, CBN を想定しているが確認していない.

08, ピークホールドと CPU 回路 (平和産業株)

入力される加工面温度の最高値のみ比較演算してメモリー, ワイヤレスで外部送信する図 1.34 で示す軽負担な高速処理システムを考案したが, 確認していない.

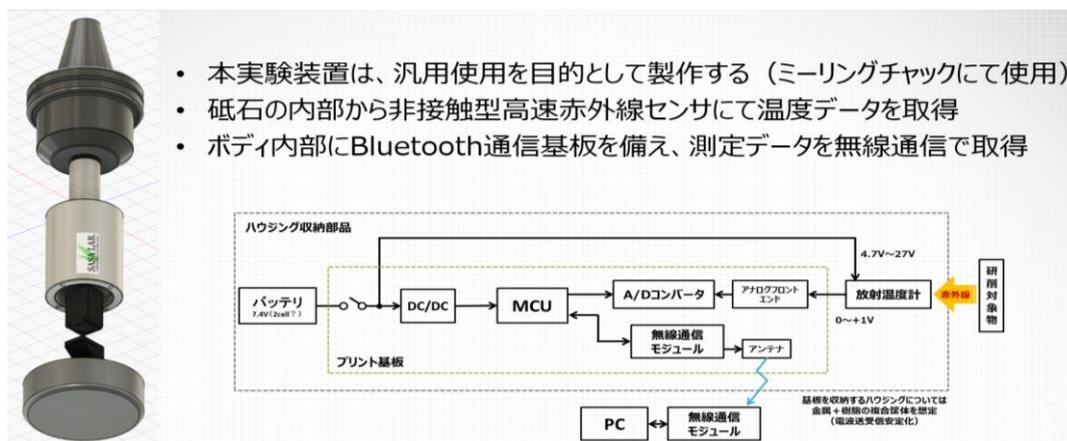


Fig.1.34 Maximum temperature retention and wireless transmitter

1.4 本研究の目的

従来の研究で挙げた八尾らの砥石内研削液供給機構は, 砥石の内側から研削液を供給することで, 外部ノズルから研削液を供給する方法と比べ研削液供給ノズルが無く被削材と干渉しないなどの優位性を持つ. また, 被削材と砥石間に研削液を供給する十分な間隔が保てないような穴内径加工やタービンブレード翼面腹側の凹面加工などでは, 確実に砥石内から研削液を供給可能であり, 砥石の目づまり抑制と研削点温度の低減効果が大きく得られる優れた方法である. 本研究もこの砥石内より冷却を行うことを基本としている. 航空・宇宙産業に用いられる CFRP は, 加工時に研削液を用いると吸湿し, 低温環境で膨潤する⁽⁴⁷⁾ことによって繊維が剥離する問題がある. このような理由から CFRP の研削加工に対して砥石内研削液供給を適用することは最適ではない. そこで本研究では, 研削液の代わりに冷風を砥石の内側から供給し加工物を冷却する砥石内冷風供給を CFRP の端面

研削に適用し砥石内研削液供給機構が持つ優れた優位性を維持継承し更なる CFRP への拡大適用を明らかにする。砥石は、センサー内蔵を前提とした薄肉で砥石内空間を確保した新設計の電着カップ砥石を用いる。

まず、冷風供給方法を砥石の内側から冷風を供給する Internal、外側から砥石と加工物の間に向けて供給する External、冷風を供給しない No Cold Air の3条件に変化させた際の砥石内冷風供給による加工点温度と加工面性状、研削抵抗、表面粗さ、砥石の表面性状への影響を調査する。次いで、実験のモデルにおいて流体解析を行い、砥石の内側から供給された冷風のスリット外部への流れを調査する。そして砥石周速と冷風の流速から近似的に最適なノズル角度を計算で求め、その角度における流体解析を行い、冷風供給方式が CFRP 研削において砥石内研削液供給機構と同等である検証を行う。

ただしノズル有無の優位性、被削材と砥石間隔が狭い場合の優位性については、同等と見做し研究の対象としない。

また、従来の研究において、研削加工のメカニズムの解明手段や加工を監視する手段として、研削温度の測定方法が報告されており、熱電対を用いた測定が多くみられる。ゼーベック効果（1770年産まれのドイツ人科学者ゼーベックが、1821年に2つの異なる金属を対にし両端の接点に温度差を与えると電流が流れることを発見）の熱電対温度測定は、発見以来200年以上経った今も広く使われているが、熱電対を用いた手法は熱電対を工作物もしくは砥石内に埋め込む必要がある。一般的に時間分解能、空間分解能ともに高い測定ができ、研究上は有用である。しかし、生産ラインでの加工データの収集を想定した場合には、すべての加工対象に熱電対を埋め込む必要があり、現実的ではない。また砥石に埋め込むことについても、実用化には課題が残る。

しかも熱電対を埋め込んで温度計測する加工点、同じく埋め込んだ砥石の加工点は熱電対の感温部(测温接点)との間隔が刻々と変化するので、間隔の調整と計測値の修正方法に課題が残る。

また、埋め込んだ熱電対の感温部(测温接点)と工具の間隔が無くなり接触した場合は、熱電対導線あるいは砥粒等の温度分離取り出しの技術課題がある。

他方、赤外線放射温度計は表面に露出した部分の赤外線を検知することにより、温度測定が可能である。サーモグラフを用いれば、容易に“見える部分”の温度分布が測定可能である。しかし、砥石と工作物の接触部のような“見えない部分”の測定はできない。以上のように、加工中、砥石と工作物が接触している研削面の温度をインプロセスで測定可能な有効な手法はない。

そこで本研究では、熱電対に代わる全く新しいデジタル志向の温度計測法として、製品または工具の何れにも計測用素線を埋め込む必要のない加工中の研削面温度をインプロセスで測定可能な赤外線放射温度計による計測法を提案する。薄肉空缶形状砥石にセンサーを内蔵しワイヤレスで計測結果を発信する世界初のスマートツールをゴールとする要素技術を研究する。商品化できれば、加工時の研削面の温度変化から砥石の最適なドレッシング時期や交換時期の予測が可能となり、製品の品質と加工能率が向上することが見込まれる。

これらを達成するために、赤外線放射温度計を用いた研削面の新しい温度測定手法として、赤外線放射温度計、光路用の小穴を砥石側面に設けた砥石、工作物の順に配置し、砥石の2つの小穴を通して研削面の温度を測定する。あるいは、光路が砥石表面に位置するときは砥石表面温度を測定する。本研究では提案する赤外線放射温度計を用いた温度測定手法の実用化に向けて、黒体炉を用いた温度測定手法の応答性の調査、CFRPの冷風ドライ研削加工への適用、赤外線放射温度計の測温部位置と測定温度の関係性の調査、熱電対を用いた温度計測手法との比較、加工時の異常の検知への適用、一般砥石への適用研究を行う。

これをもって、政府が最後のチャンスだと警鐘を鳴らす立ち遅れた我が国のデジタル化に寄与したい。

1.5 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。

- ・第1章「緒論」では、社会的、工業的・工学的背景、従来の研究、本研究の目的、本論文の構成について述べる。
- ・第2章「砥石内冷風研削によるCFRPの加工面性状と加工特性への影響」では、冷風供給方法を変化させ、砥石内冷風供給による加工面性状と加工点温度、研削抵抗、表面粗さ、砥石の表面性状への影響を調査する。
- ・第3章「ノズルの設置条件が冷風の流れに及ぼす影響」では、はじめに第2章の実験モデルの流体解析を行った。そして最適なノズル角度を砥石の周速と冷風の流速から近似的に求め、その結果をもとに流体解析を行い、最適な砥石内冷風供給方法を検討する。
- ・第4章「赤外線放射温度計を用いた研削面の温度測定手法の提案」では、提案する赤外線放射温度計を用いた手法の測定原理、従来の温度測定手法に対する優位性について述べる。そして黒体炉を測定対象として本手法を適用し、主軸回転速度に対する測定温度波形の応答性について調査する。
- ・第5章「赤外線放射温度計を用いた研削面の温度測定手法によるCFRPの研削加工時の異常の検知への適用」では、赤外線放射温度計を用いた温度計測手法をCFRPのドライ研削加工に適用し、加工中の研削面温度の測定を行い、実加工にも適用可能であることを検証する。その後、赤外線放射温度計の測温部の位置と測定温度との関係性を、数値解析によって求めた研削面の温度分布から明らかにする。また従来の温度計測手法である熱電対を用いた温度計測手法と比較することで、温度測定結果の妥当性を検証する。そして加工の異常の発生を検知に赤外線放射温度計を用いた温度計測手法が有効であることを調査し、最後に一般砥石であるビトリファイド砥石にも本手法が適用可能であることを検証する。
- ・第6章「結論」では、以上のまとめとしての結論及び今後の展望を述べる。

第2章

砥石内冷風研削による CFRP の加工面性状と加工特性への影響

2.1 はじめに

本章では、4章5章の赤外線放射温度計を砥石に内蔵する前提と乾式のセンタースルー機能が無いマシニングセンタに対応する新設計の薄肉電着カップ砥石を用いて、冷風供給条件を変化させてCFRPの端面研削をした際の加工面性状と加工特性への影響を調査した。加工面性状については表面粗さと加工面の観察、加工特性については研削抵抗と加工面温度により評価した。

2.2 砥石の概要

2.2.1 砥石の要素

砥石とは砥粒を結合剤によって結合し、成型した砥粒工具であり、一般的には研削盤主軸に装着して使用される。砥石は円盤形、カップ形、リング形など用途に合わせてさまざまな形状が存在する。砥石は切れ刃の役割をする砥粒とこれらをつなぎ留める結合材から形成されているが、それらの隙間である気孔が砥石全体の多くを占めている。図2.1に砥石の概略図とその要素を示す。気孔は研削液や切りくずを一時的に保持し、冷却効果や切りくずを排出し目づまりを抑制する効果を有する。

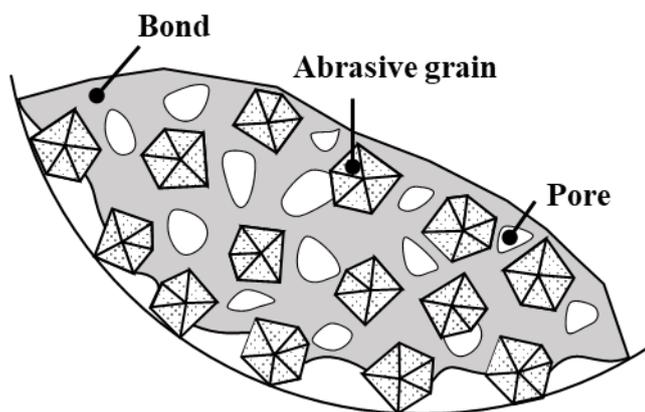


Fig. 2.1 Element of grinding wheel

2.2.2 砥石の仕様

砥石の仕様は砥材、結合剤、粒度、結合度、組織の5因子で調整される。

砥材とは砥粒の材質のことであり、一般砥粒としてはアルミナ系砥粒、炭化ケイ素系砥

粒, ジルコニア, ジルコニアアルミナ砥粒, 超砥粒としてはダイヤモンド, CBN などがある。超砥粒は一般砥粒と比べ, 著しく高い硬度を持ち, 硬く鋭利な切れ刃は切れ味に優れ, 高能率・長寿命で高い研削比を実現する。ダイヤモンドは鉱物の中で最も硬い砥粒であり, 耐摩耗性, 耐薬品性, 高熱伝導率などの特性に優れ, 硬脆材料や多結晶ダイヤモンド(PCD)などの研削に適している。一方, CBN はダイヤモンドに次いで硬い砥粒であり, 耐摩耗性に優れ, 熱に強く鉄との反応性も低いため, 鉄系材料の研削に適している。

一般砥粒に適用される結合剤には, ガラス質のビトリファイドボンドや熱硬化性樹脂を主成分としたレジノイドボンドなどがある。特にビトリファイドボンドは, 砥粒の保持力が強く, 気孔を有することから一般砥石の中で最も多く使用されている結合剤である。

粒度とは砥石を構成する砥粒の寸法を表す指標であり, 粒度 F4~F220 までの砥粒を粗粒と呼ぶ。粗粒の粒度検査はふるいを用いた粒度分布試験により行われ, ふるいに留まった累積質量分布により粒度が決定される。また, 粒度番号は1インチあたりのふるい目の数を表しており, 砥粒番号が大きくなるほど平均粒径は小さくなる。平均粒径 D_{ab} と粒度 F には以下の関係が確認されている⁽⁴⁸⁾。

$$D_{ab} = 22.9F^{-1.08} \quad (2.1)$$

結合度とは砥粒の保持力を表す指標であり, 柔らかい方から A~Z までの 26 段階で分けられる。また, 組織とは砥石の単位体積あたりに砥粒の体積が占める割合(砥粒率)を表す指標であり, 密な方から 0~14 までの 15 段階で分けられる。一般に結合度が大きく, 組織が密であるほど砥粒の保持力が大きくなる。

2.2.3 超砥粒ホイール

超砥粒ホイールは金属の台金の外周に超砥粒層を持つ構造となっており, 仕様は主に砥材, 結合材, 粒度, 結合度, 集中度で調整される。

結合材にはレジノイド, ビトリファイド, 金属粉末を主成分とするメタル, ニッケルめっきによって砥粒を保持する電着などがある。超砥粒ホイールの粒度の目安として, #140 を基準とし, それより粗い砥粒は粗加工, 細かい砥粒は仕上げ加工向きとされている。平均粒径は#325 までしか JIS で規定されておらず, #400 より細かい粒度は各メーカーごとに異なる。結合度は N を基準とし, 柔らかい方から J~R までの 9 段階で分けられる。集中度とは砥粒層中の超砥粒の含有割合を示し, 集中度が 100 の場合, 砥粒層中における超砥粒の体積率は 25%であるとされている。

超砥粒ホイールの一つである電着砥石は超砥粒をニッケルめっきによって台金表面に一層だけ保持した構造であり, 特徴として突き出し量が高い点が挙げられる。突き出し量とは工具表面から砥粒の高さを示すものであり, メタルボンドの超砥粒ホイールの突き出し量が砥粒の粒径の約 10%~30%であるのに対して, 電着砥石は粒径の約 50%突き出ししており, 砥粒が一度に削り取る量が多く, 高能率な加工が可能である。しかし, 突き出し量が高いが故, 良好な表面粗さを得るには粒度の細かい砥粒を用いる必要がある。また, 砥粒密度も他の結合剤に比べ高いため, 砥粒の摩耗による変形が少なく, 加工精度は安定して

いる。

2.2.4 薄肉電着カップ砥石

本研究では薄肉電着カップ砥石を作製し使用した。図 2.2 に砥石の写真、図 2.3 に砥石表面の拡大写真を示す。設計モデルは本研究室と株式会社名光精機、平和産業株式会社と共同研究中の発電用ガスタービンのブレード翼面研削で使う図 2.4 の中実超砥粒電着砥石と外形状のみ合わせて互換性を確保し、形状を薄肉電着カップに変え外径 120mm の砥石の台金の材質は S45C とし、砥石側面の厚さが 3 mm のカップ形状で、砥石外周に幅 1 mm の内面と外面で貫通したスリットが 50 箇所放射状に等間隔に設けられている。また砥石外周には粒度#120 のダイヤモンド砥粒(SD)が電着されている。中空のカップ形状であるため、センタースルーが乾式対応でない工作機械であっても、冷風をサイドスルーで供給してノズルを砥石内面近くまで設置することが可能である。そして、砥石の側面の厚さを薄肉 3 mm にし、内面と外面を貫通したスリットを設けることで、冷風が砥石内側からスリットを通り抜け、加工物を冷却することを可能にした。加工対象である CFRP は研削抵抗が比較的小さいため、砥石側面の厚さを比較的薄い 3 mm に設計した。スリット幅は小さすぎると電着する際、砥粒がスリットを塞いでしまう恐れがある。また大きすぎると、砥石の剛性が低下し、砥石が壊れてしまう恐れがあるため、スリット幅は、砥石の剛性をできるだけ大きくし、電着砥粒がスリットを塞ぐことのない 1 mm に設計した。

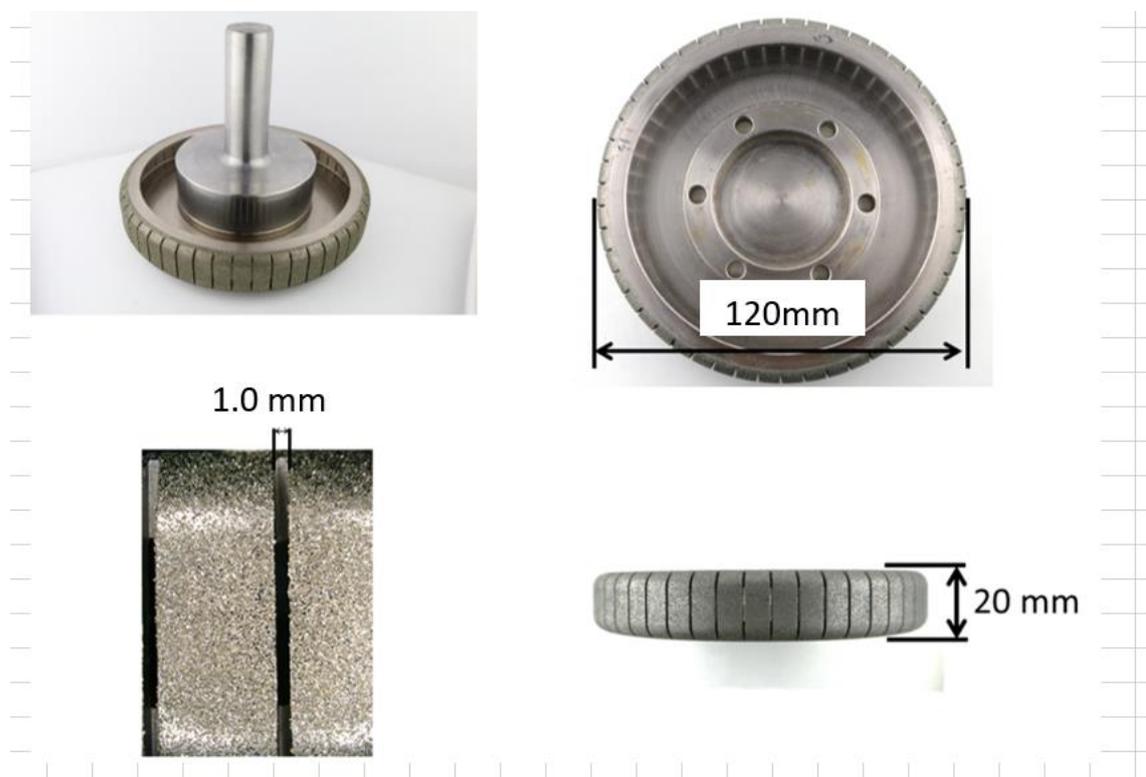


Fig. 2.2 Grinding wheel

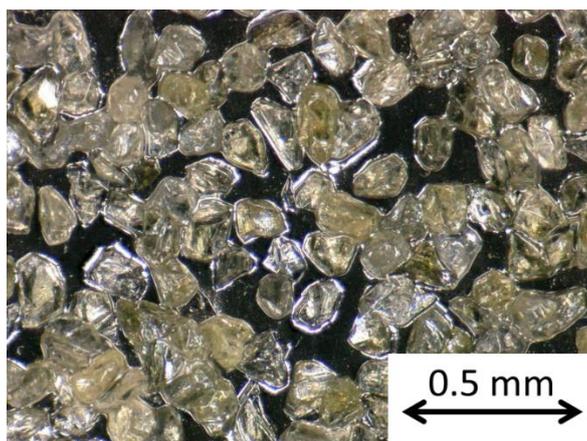


Fig. 2.3 Micrograph of grinding wheel



Fig. 2.4 Blade curved surface grinding wheel model

2.3 冷風機構

本実験で用いた冷風装置(TOHIN エアクーラーAC-80)の外観を図 2.5 に示す. コンプレッサーより供給される圧縮空気を図 2.6 に示すドライフィルター(前田シェルサービス レマン・ドライフィルターM-110-5)で水滴, 油滴を除去し, クリーンなドライエアに変え, 冷風装置に供給する. 冷風装置は装置内のゼネレータの働きによって圧縮空気を高速で回転させ, 冷風装置内部の渦流, 圧縮, 膨張, 圧力差を利用して冷風と熱風に分離し, そのうち冷風をノズル側へ送り込む. なお, 冷風機構の配管内に流量計を設置して流量の条件を管理した. 流量計には SMC デジタルフロースイッチ PFMB7202 を使用した.



Fig. 2.5 Cold air generator



Fig. 2.6 Dry Filter

2.4 マシニングセンタ

本研究では、マシニングセンタ（ヤマザキマザック FJV-250 UHS）を用いて研削加工実験を行った。マシニングセンタの外観を図 2.7 に示す。図 2.8 のように冷風装置を主軸台にマグネットで取り付け、砥石内面近くに冷風ノズルを設置し、加工点の砥石内面に向かって冷風を供給した。

センタースルー機能は有るが一般的な液冷の湿式仕様で、冷風の乾式には対応していないためサイドスルーが必要となる。



Fig. 2.7 Machining Center

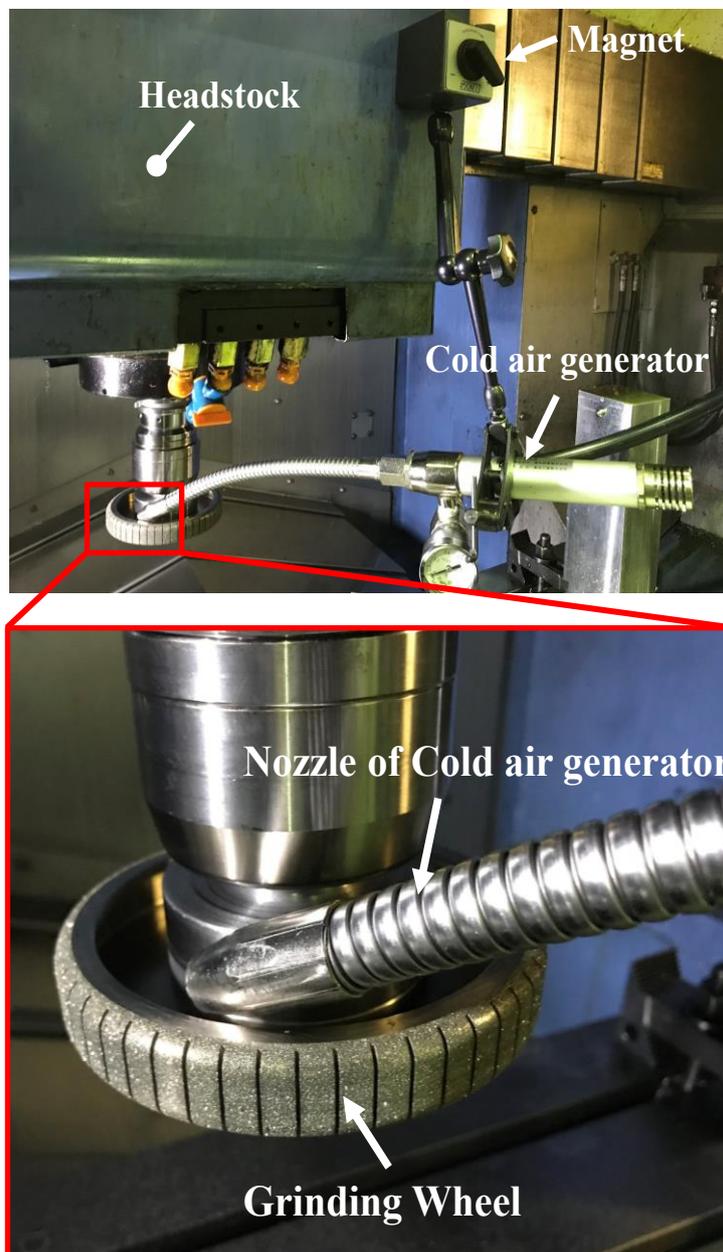
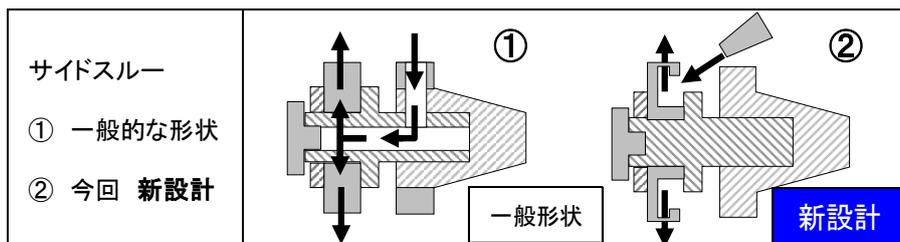


Fig. 2.8 Setting of Cold air generator

2.5 CFRP の概要

本研究で使用した CFRP の機械的性質を表 2.1 に示す。試験片は一方向プリプレグ（東邦テナックス社製 QU135-197A）を積層し、板厚 7.8mm に硬化した CFRP プレートを使用した。本試験片の積層構成は 0°, -45°, 45°, 90°とした擬似等方材である。図 2.9 に本試験

片の繊維配向方向の配置を示す。下層から 0° 、 -45° 、 45° 、 90° を一組として 5 組を積層した後、今度は逆に 90° 、 45° 、 -45° 、 0° の組み合わせで 5 組が積層されている。本研究では特に航空機向け CFRP 部品の加工を想定しているため、被削材も航空機部材向けの CFRP とした。

Table. 2.1 Mechanical property of CFRP

Carbon fiber		TOHO TENAX QU 135-197A
Resin		Epoxy resin #135
Fabric weight	g/m^2	190
Curing temperature	$^\circ\text{C}$	180
Thickness of prepreg	mm	0.187
Number of layers		40

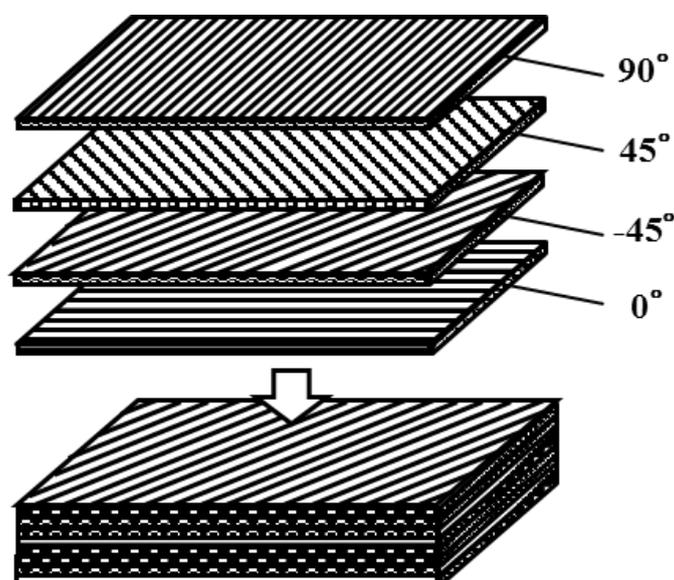


Fig. 2.9 Surface of CFRP

2.6 加工面温度の測定

本実験では笹原らが行った CFRP 研削時の温度測定手法を参考に、熱電対を CFRP 内部に埋め込むことで加工中の CFRP の加工面温度を測定した⁽⁴⁹⁾。

2.6.1 測定原理

砥石と工作物との干渉領域において研削温度を実測する計測方法は、熱電対埋め込み法が現在の計測技術では唯一の方法である。この熱電対埋め込み法は、工作物の内部に熱電対を埋め込み、砥粒の切削時に熱接点を形成させることで温度信号を検出する方法である⁽⁵⁰⁾。熱電対とは、ゼーベック効果と呼ばれる異種金属界面で温度差が電圧に変換される現

象を利用したものである。2種類の異なる金属線により閉回路を構成し、一方の接点を熱して他の接点を一定の温度に保つと接点間にその温度差に対応した熱起電力が生じ回路に電流が流れる。これがゼーベック効果である。したがって、回路の熱起電力を測定することで2点間の温度差が測定できる。熱する点を測温接点といい、溶接などで完全に接続される。もう一方の一定の温度に保つ点を基準接点といい、導線または計測器と接続されて基準の温度に保たれる。温度特性が接点の寸法によらないことから接点寸法を小さくできるため、局所、高応答の測定が可能である⁽⁵¹⁾。熱電対を構成する金属の組み合わせは多数あるが、JIS C 1602 で種類特性が規格化されている。本実験では、熱電対の中でも最も多く利用されている K 型熱電対を用いた。K 型熱電対は+極がクロメル、-極がアルメルで構成された熱電対のことで、熱起電力が大きく温度特性が直線的であることから工業的に使用しやすい。線径にもよるが常用限度 1000℃、加熱使用限度 1200℃、低温でも-200℃程度まで使用可能で、1000℃以下で最もよく用いられる⁽⁵²⁾。

2.6.2 試験片の概要

図 2.10, 2.11 には、実験に用いた試験片の寸法と製作した試験片の写真を示す。幅 100 mm、板厚 7.8 mm の CFRP 板材に幅 2 mm、深さ 4 mm の溝を等間隔に 3 か所設け、その溝に熱電対を挿入しエポキシ樹脂で固定した。なお、使用した熱電対は被覆が厚く、そのままでは溝に挿入することができないため被覆を剥いてアクリル樹脂系塗料を塗布することで絶縁性を維持したまま溝へ設置した。また、埋め込み前に塗料を塗布したクロメル線とアルメル線を接着剤により密着させた。これにより砥粒の切削時に塑性変形した素線同士が導通し、熱接点を形成する確率を高め、熱起電力測定の実定化を図った。

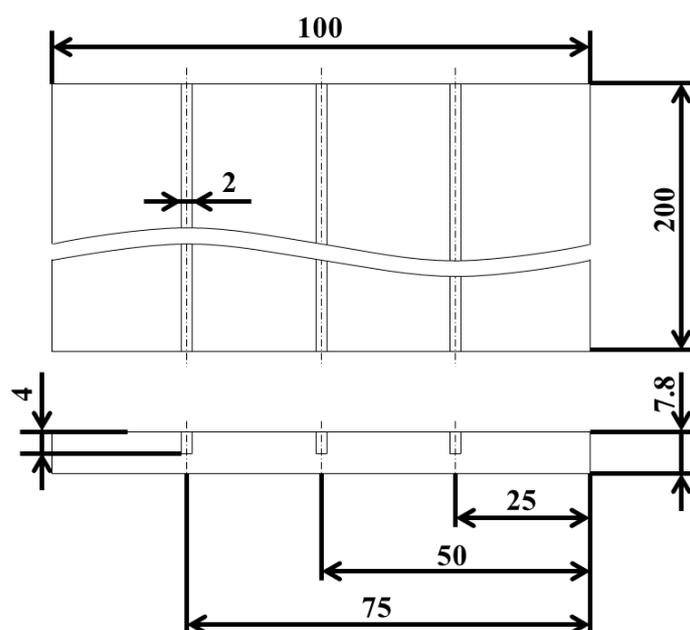


Fig. 2.10 Dimensions of work piece

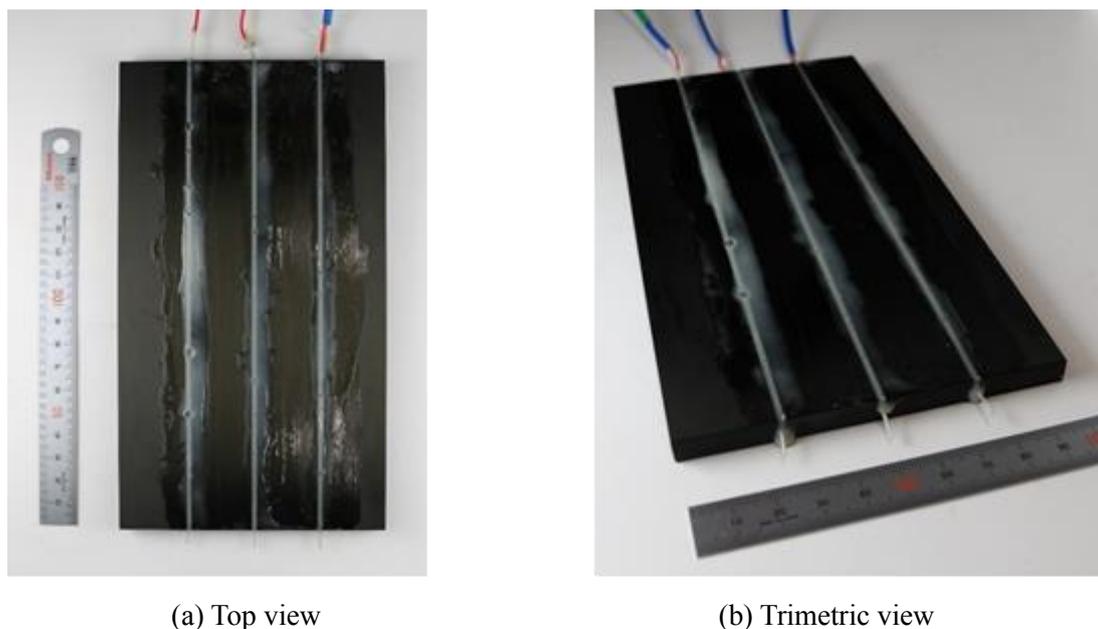


Fig. 2.11 Photograph of work piece

2.6.3 測定方法

熱電対による温度測定方法には、冷接点補償を用いる方法と基準接点補償を用いる方法の2種類がある。冷接点補償では、測定中の冷接点温度を氷水等により 0°C に保つ必要がある一方、基準接点補償では、計測器側接点の温度を測定する必要がある。本研究では、冷接点を設ける必要のない基準接点補償を用いた。使用した熱起電力 V [mV] と測温接点温度 T [$^{\circ}\text{C}$] の関係式を式 (2.1) に示す。なお、 T_0 [$^{\circ}\text{C}$] は計測器側接点の温度、 k は比例定数である。比例定数 k については JIS C 1602 に記載された K 型熱電対の 0°C から 600°C までの規準熱起電力を元に最小二乗法による直線近似により傾きを求めそれを使用した。

$$T = kV + T_0 \quad (2.1)$$

本実験では熱電対先端を切断するように研削加工を行ったが、そのままでは熱電対の接点が開放した際に電位が不定となってノイズが入り、その後のデータ整理に支障をきたす。これを避けるために熱電対と並列に 470Ω の固定抵抗を接続した。熱電対の接点が開放した場合にも測定回路は抵抗器があるために閉じたままであり、ノイズの混入を避けるようにした。この方法により、熱電対が開放されると測定される温度は室温付近を指示する。

表 2.2, 2.3 にそれぞれ基準接点温度と加工面温度の測定条件を示す。基準接点温度 T_0 の測定には、熱電対用の計測ユニット (KEYENCE NR-TH08) を使用した。一方、加工面温度 (熱起電力 V) の測定には本来はずみ計測ユニット (KEYENCE NR-ST04) を使用した。これは、研削時に砥石が測定箇所を通過する時間は数百 ms ~ 数 s 程度であり、最大サンプリング周波数が 10 Hz の NR-TH08 では計測に必要なサンプリング周波数が設定できなかったためである。なお、NR-ST04 を用いた加工面温度の計測ではサンプリング周波数を 1 kHz に設定した。

Table. 2.2 Measurement conditions of reference junction temperature

Measuring unit	NR-TH08 (KEYENCE)	
Maximum sampling frequency	Hz	10
Sampling frequency used	Hz	10
Resolution	bit	16
Range	V	±50

Table. 2.3 Measurement conditions of machined surface temperature

Measuring unit	NR-ST04 (KEYENCE)	
Maximum sampling frequency	kHz	50
Sampling frequency used	kHz	1
Resolution	bit	16
Range	mV	±50

2.7 表面粗さの測定方法

精密加工や微細加工などにみられる加工の高精度化や、高速切削などにみられる加工の高能率化など、現在も加工技術は向上し続けている。その加工面の品質を決めるパラメータとして、表面粗さは非常に重要な情報のひとつである。表面粗さは、被削材、工具、工作機械、加工条件などの影響を受ける。研削加工は切削加工と比較すると除去速度は劣るが、粗さが小さく良好な仕上げ面が得られる。研削面の粗さは一般的に方向性を持ち、研削方向に直角方向の粗さが最も大きく、研削方向の粗さが最も小さくなる。そのため、研削面の粗さを論じる際には、研削方向に直角の粗さが取り上げられることが多い。

本研究では、触針式測定法により加工面の算術平均粗さ R_a の測定を行った。触針式測定法は、表面粗さの測定方法の最も代表的なものである。測定表面を先端の尖った針でなぞり、その凹凸を記録して結果を表示する。表面粗さの測定には、小形表面粗さ測定機（ミツトヨ SJ-210）を用いた。装置の外観を図 2.12 に示す。測定長さを 4 mm、カットオフ値 λ_s 、 λ_c をそれぞれ 2.5 μm 、0.8 mm とし、測定方向は、送り方向に対して垂直方向とした。測定箇所は図 2.13 のように研削開始点から 15mm, 30mm, 55 mm, 70 mm, 85 mm の 5 箇所とし、最大値と最小値を除外した 3 点の平均値を評価値とした。



Fig. 2.12 Surface roughness measuring device

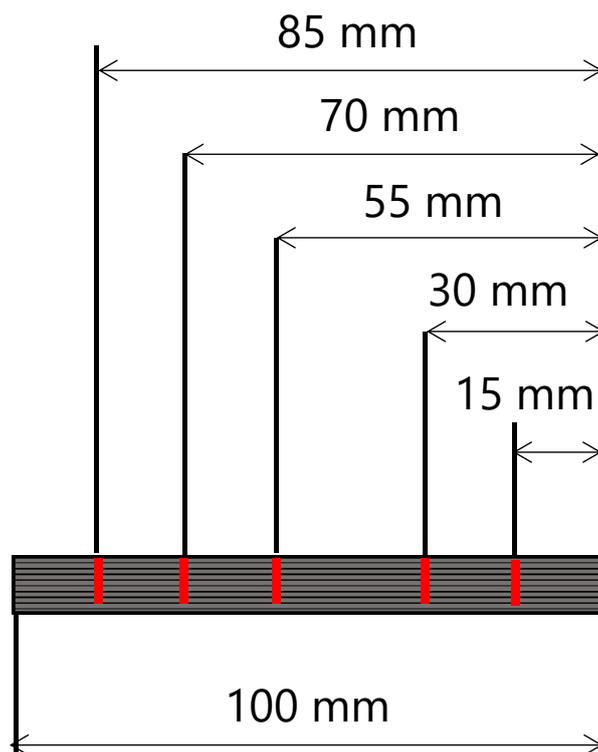


Fig. 2.13 Measurement points of surface roughness

2.8 研削抵抗の測定方法

研削抵抗の測定には様々な方法が考案されている。ひずみゲージ式・半導体ゲージ式・圧電素子式の圧力変換器を用いて油圧の変化を力として検出する方法や、電流計を用いて研削抵抗によるモータ電流を電磁誘導の原理で計測する方法、過電流変位計を用いコイルに流した高周波電流で誘導された金属表面の過電流を検出する方法、電気マイクロメータを用いて先端子の移動変位をトランスの電磁誘導で検出する方法、さらに静電容量型変位計を用いて高周波電界を発生させた先端子と対象物間の静電容量を計測する方法などが存在する⁽⁵⁰⁾。

本研究では、それらの中でも特に高剛性、高精度と優れた特徴を持つ水晶圧電式三成分動力計（KISTLER 9257B）を用いた。動力計の出力は分岐ボックス（KISTLER 5407A）を介してチャージメータ（KISTLER 5015A）に接続されている。表 2.4 に動力計の諸元を、表 2.5 にチャージメータの諸元を示す。

図 2.14 に示す座標系について、矢印の向きを正とし接線研削抵抗： F_x 、垂直研削抵抗： F_y 、軸方向研削抵抗： F_z の三成分を測定した。動力計の出力は、分岐ボックス（KISTLER 5407A）、チャージメータ（KISTLER 5015A）を介してデータロガー（KEYENCE NR-600）に入力し、これをさらにパソコンに入力して観測ソフト（WAVE LOGGER PRO）を用いてデータを収集した。測定条件を表 2.4、表 2.5、表 2.6 に示す。

Table. 2.4 Specification of dynamometer

Specifications	9257B (KISTLER)		
Measuring Range	F_x, F_y, F_z	kN	± 5
Sensitivity	F_x, F_y	pC/N	≈ -7.5
	F_z	pC/N	≈ -3.7
Natural Frequency	$f_0(x, y, z)$	kHz	≈ 3.5
Operating temperature range		°C	0 ~ 70
Length		mm	≈ 170
Width		mm	≈ 140
Height		mm	≈ 60
Connection	Fischer 9 pol. Neg.		
Sealing	welded/epoxy (IP67) with connecting cable		
Mass		kg	7.3

Table. 2.5 Specification of chargemeter

Specifications	Type 5015A00X0	
Model	19" rack module	
Adjustment	with serial interface RS-232C	
Measuring range	pC	$\pm 2 \sim \pm 2200000$
Frequency Range	kHz	$\approx 0 \sim 200$
Output signal	V	$\pm 10 \sim \pm 2$
Accuracy	%	$< \pm 3$
Supply	115/230 VAC switch able	
Operating temperature range	°C	0 ~ 50
Mass	kg	2.3
Connection	BNC neg. Output: BNC neg.	
Width	mm	105.3
Height	mm	142
Depth	mm	253.2

Table.2.6 Measurement conditions of grinding force

Dynamometer	9257B (KISTLER)		
Charge meter	5015A (KISTLER)		
Date logger	NR-600 (KEYENCE)		
Measuring unit	NR-CA04 (KEYENCE)		
Data acquisition software	WAVE LOGGER PRO (KEYENCE)		
Sampling frequency	kHz	1	
Sensitivity	F_x	pC/N	-7.851
	F_y	pC/N	-7.874
	F_z	pC/N	-3.765
Range	N	±1000	

2.9 実験方法

実験のシステム全体の概略図を図 2.14 に示す。マシニングセンタのテーブル上に動力計を取り付け、さらに試験片取り付けジグを介して動力計に CFRP 試験片を固定した。表 2.7 に今回行った実験条件を示す。砥石は 2.2.4 節で示した #120 のダイヤモンドが電着された薄肉電着カップ砥石を使用した。砥石内冷風の影響を調べるため、冷風供給方法を図 2.15(a) のように砥石の内側から冷風を供給する Internal、図 2.15(b) のように砥石外側から冷風を供給する External、冷風を供給しない No Cold Air の 3 条件を切り込み深さ 0.02, 0.1, 1.0mm において行った。Internal は図 2.16(a) のようにノズルと研削点との距離を 50 mm、加工面(XY 面)となす角度が約 45°、YZ 面となす角度が約 30° になるように設置した。また External は図 2.16(b) のようにノズルを研削点との距離を 50 mm、加工面(XY 面)となす角度を約 15° となるように設置した。なお全条件、研削速度は 1200 m/min、送り速度は 500 mm/min、砥石の回転方向はダウンカットで固定した。供給する冷風の条件は風量計で管理し、784 L/min、冷風温度は 2 °C で固定した。

各条件の研削前にはエンドミルで切り込み深さ 0.2 mm で数回面出し加工を行った。各条件研削後には卓上バンドソーによって加工面から 7 mm 程度の位置でカットし、各条件の加工面を保存しておき、全加工条件の終了後、加工面性状を確認した。

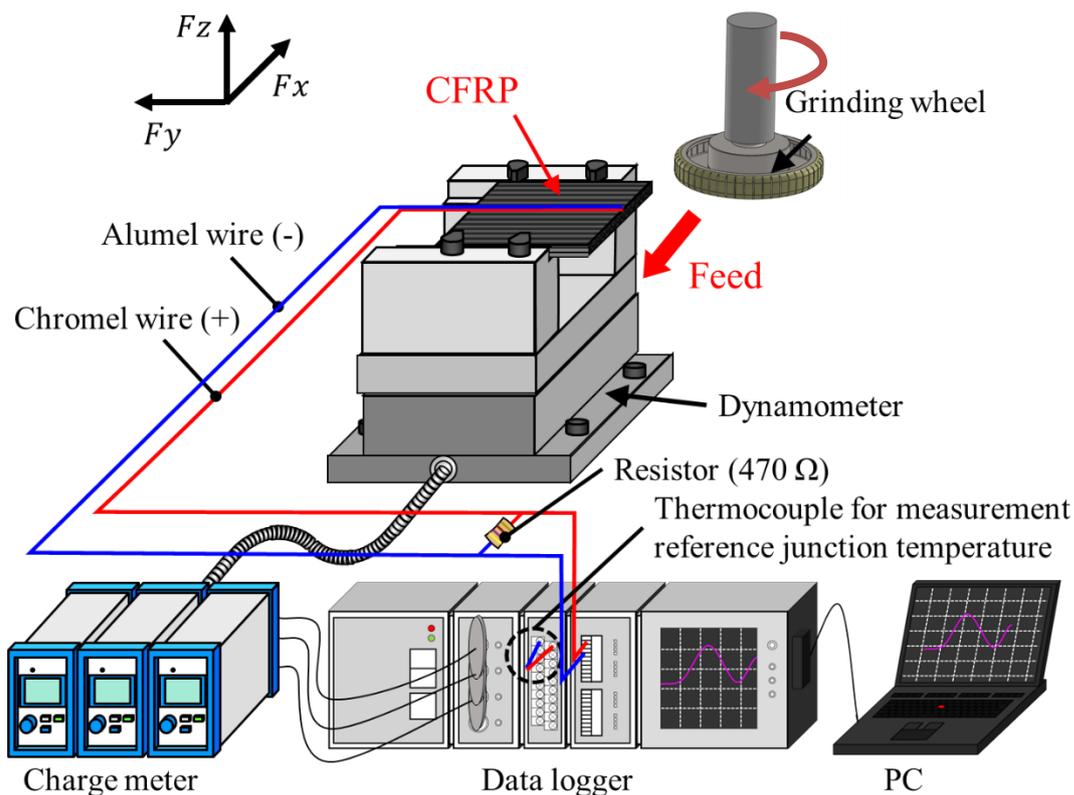
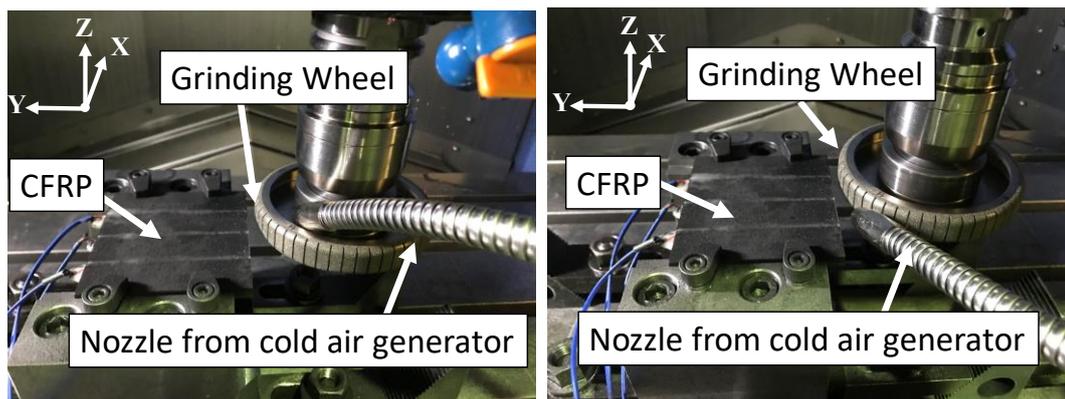


Fig. 2.14 System of measuring machining characteristics

Table. 2.7 Machining conditions

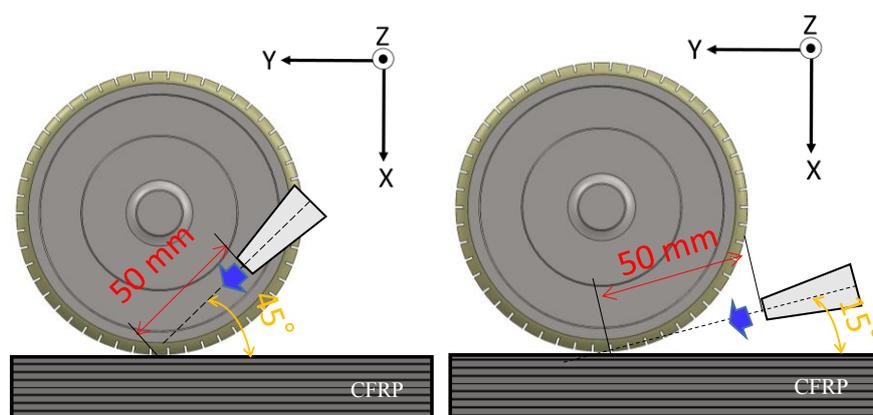
Grain size		Internal	External	No Cold Air
Grain		SD		
Grain Size		#120		
Grinding speed V	m/min	1200		
Feed rate v	mm/min	500		
Depth of cut t	mm	0.02, 0.1, 1.0		
Grinding distance		100mm \times 5 Pass		
Grinding direction		Down cut		
Cold air volume	L/min	784		
Cold air temperature	$^{\circ}\text{C}$	2		



(a) Internal

(b) External

Fig. 2.15 Experimental Setup



(a) Internal

(b) External

Fig. 2.16 Schematic of setting method of nozzle

2.10 実験結果

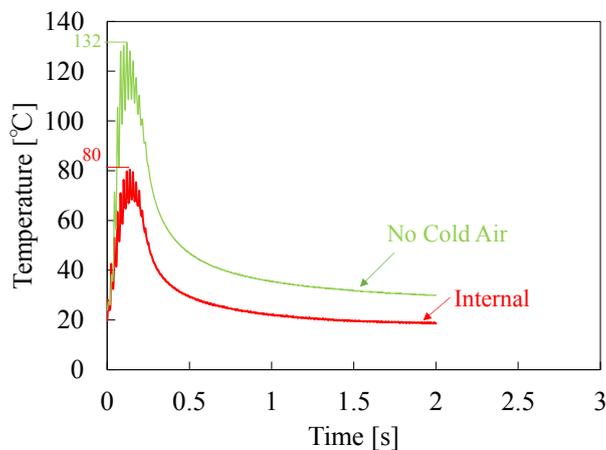
2.10.1 加工点温度

切り込み深さ 0.02, 0.1, 1.0 mm における冷風供給方法を変化させた際の加工点温度の測定結果を図 2.17(a), (b), (c)にそれぞれ示す。なお、切り込み深さ 0.02mm の External はデータが取れていなかったため除いた。

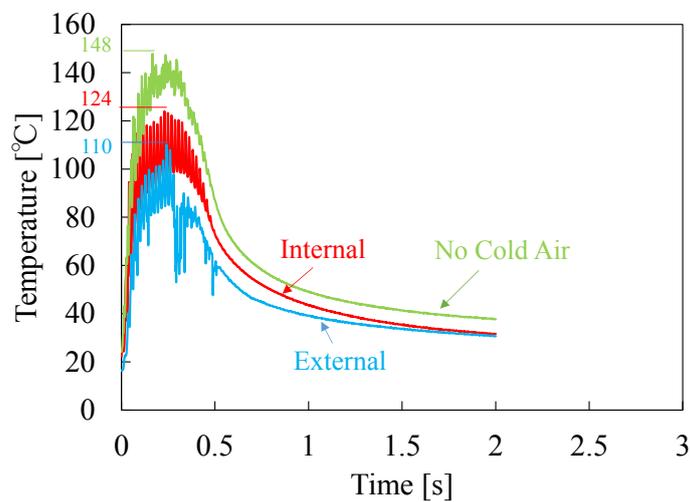
同図より各条件の最高温度は切り込み量 0.02 mm の場合 Internal で 80℃, No Cold Air で 132℃, 切り込み量 0.1 mm の場合 Internal で 124℃, External で 110℃, No Cold Air で 148℃, 切り込み量 1.0 mm において Internal で 221℃, External で 262℃, No Cold Air で 284℃という結果になり、いずれの切り込み深さの条件においても砥石内冷風供給による温度低減効果が確認された。

図 2.17(b), (c)より、切り込み深さ 0.1, 1.0 mm の条件において No Cold Air に比べ Internal と External 両方で温度低減効果が確認された。切り込み深さ 0.1 mm のときは External の方が、Internal より温度低減効果があったが、切り込み深さ 1.0 mm の場合は、Internal の方が External より温度低減効果が大きかった。これは図 2.18 に示す切り込み深さが大きい場合、External で

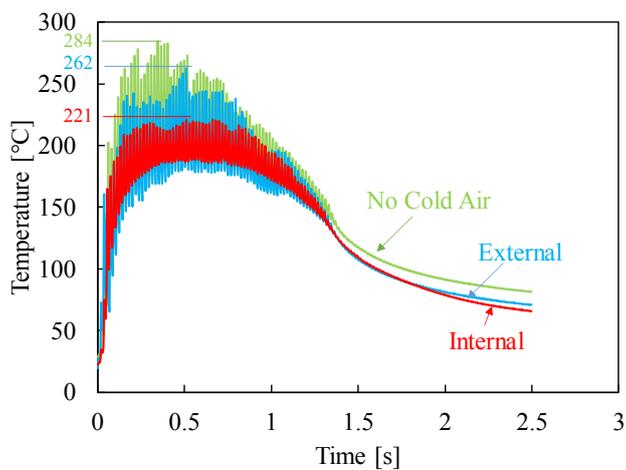
は冷風が行き届かなかった加工点に, **Internal** は内側から冷風を供給することで冷却できたからだと考えられる



(a) Depth of cut = 0.02 mm

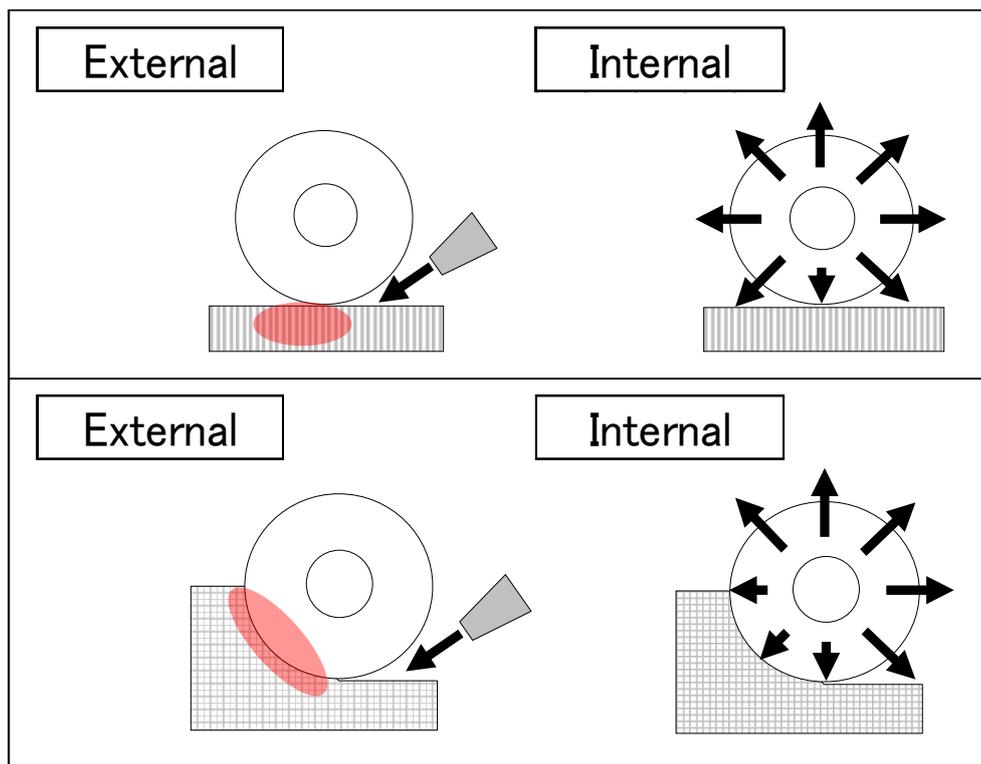


(b) Depth of cut = 0.1 mm



(c) Depth of cut = 1.0 mm

Fig. 2.17 Temperature in process

Fig. 2.18 Comparison of external and internal

2.11 加工後砥石表面観察

図 2.19 に切り込み深さと冷風供給方法を変化させた 9 条件の加工後砥石の表面観察結果を示す。なおこれらは各条件同じ箇所の砥石表面の写真である。各切り込み深さにおいて No Cold Air と Internal を比較すると、切り込み深さ 0.02 mm では No Cold Air は CFRP の黒い切りくずで砥粒がほとんど埋まっておりダイヤモンド砥粒が確認できないが、Internal は切りくずの付着が少なく、ほとんどの砥粒が確認できており、目づまりが少ない結果となった。一方、切り込み深さ 0.1, 1.0 mm においては 0.02 mm ほどの顕著な切りくず洗浄効果は見られなかった。これは砥石内冷風供給の洗浄効果には限界があるためだと考えられる。切り込み深さ 0.02 mm においては発生する切りくずも少なく、砥石内冷風による洗浄効果で間に合っていたが、切り込み深さの増大で間に合わなくなったと考えられる。また Internal と External を比較すると、0.02 mm においては顕著な違いが確認されたが、切り込み深さ 0.1, 1.0 mm において、ほとんど変わらない結果となった。これより目づまり抑制効果の点における External に対する砥石内冷風の優位性は、切り込み深さが 0.02 mm のように微小な場合はあるが、切り込み深さが大きくなると、砥石内冷風の切りくず洗浄効果が間に合わなくなり、優位性はなくなると考えられる。

これらの観察結果を 2.12 節において表面粗さの測定結果と合わせて考察する。

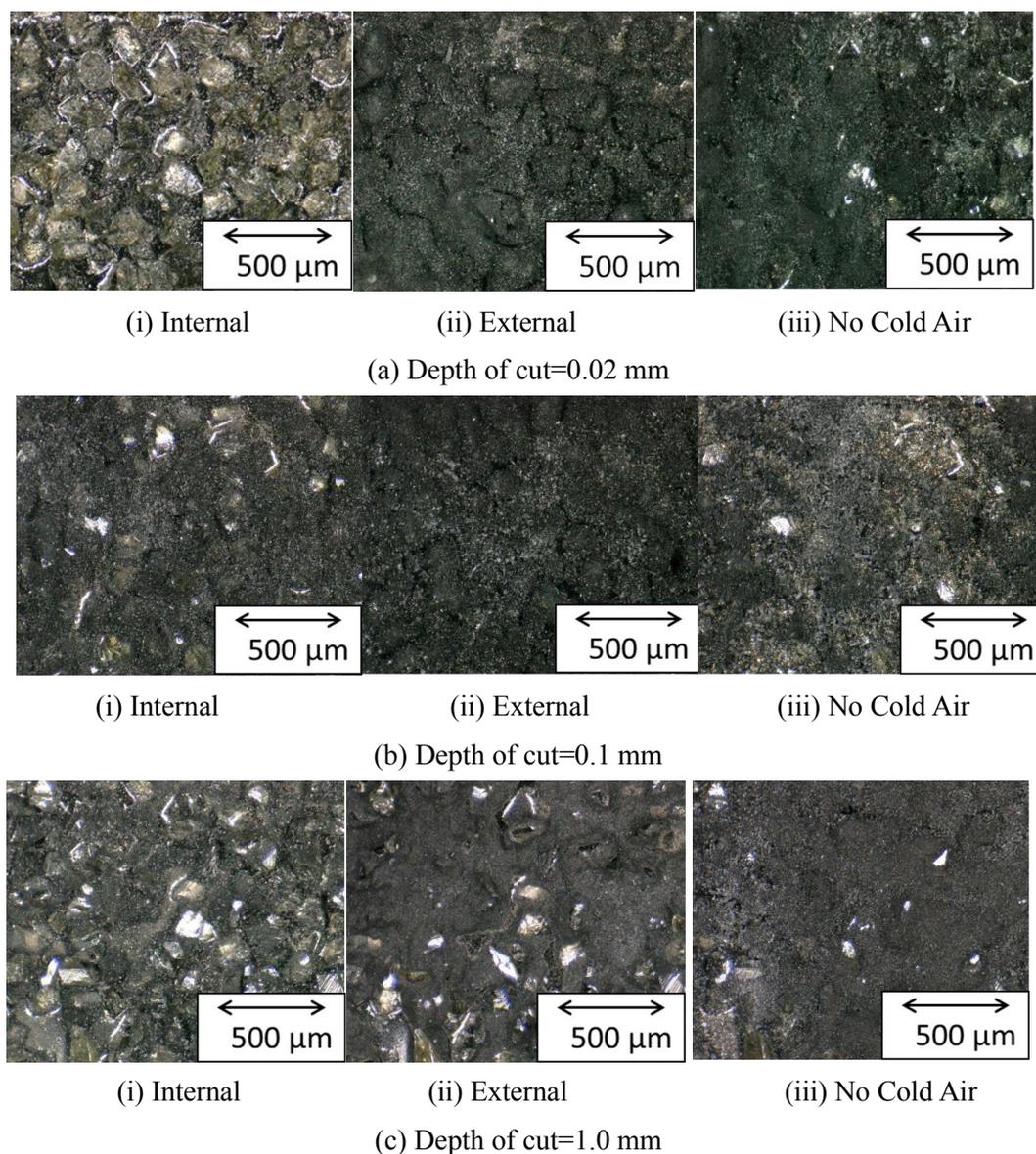


Fig. 2.19 Surface of grinding wheel

2.12 加工表面粗さ

図 2.20(a)(b)(c)に切り込み深さ 0.02, 0.1, 1.0 mm における冷風供給方法の違いによる表面粗さの測定結果をそれぞれ示す。

同図(a)の切り込み深さが 0.02 mm の場合は、No Cold Air と External に比べて、Internal は表面粗さが良好な結果となった。これは 3.8 節で述べたように砥石表面観察において Internal は最も切りくずが付着していなかったため、切りくずが加工面を傷つけることがなかったからだと考えられる。同図(b)の切り込み深さが 0.1 mm の場合は、ほとんど表面粗さに差はなかった。これは 3.8 節で述べたように砥石表面観察の結果が全条件ほとんど変わらないため、切り込み深さ 0.02 mm のときと同じ理由で表面粗さに差はなかったと考えられる。同図(c)の切り込み深さが 1.0 mm の場合は Internal, External は No Cold Air より表面粗さが良好な結果となった。これも前節で述べた砥石表面の状態と一致しており、

Internal と External は冷風による砥石の切りくず洗浄効果があるため、切りくずによる加工面への干渉が少なかったからだと考えられる。

また、図 2.21 に切り込み深さを変化させた 9 条件すべての表面粗さの結果のまとめたものを示す。全ての冷風供給条件において切り込み深さが深いほど表面粗さが向上している。これは電着砥石の特性である切れ刃高さが高いからと考えられる。今回用いた薄肉電着砥石の砥粒の平均粒径は 0.125 mm であり、そのうち約 50% (0.06 mm) がめっき層から突き出ている。切り込み深さが 0.02 mm と小さい場合では作用しない砥粒が存在するが、切り込み深さが 0.1, 1.0 mm と大きくなると作用する砥粒が増えることで表面がよりならされ、表面粗さが向上したと考えられる。

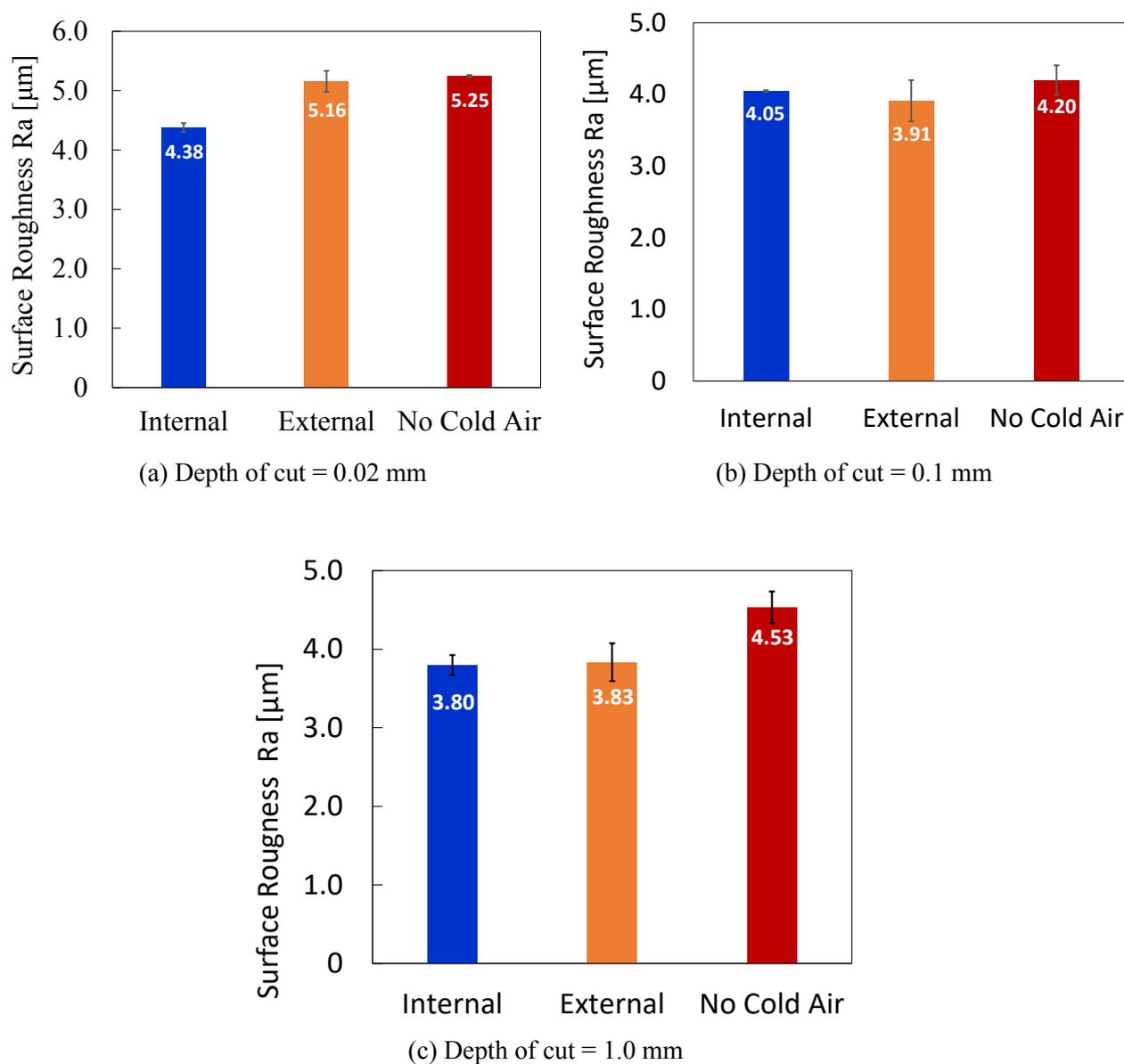


Fig. 2.20 Surface Roughness (Internal, External, No Cold Air)

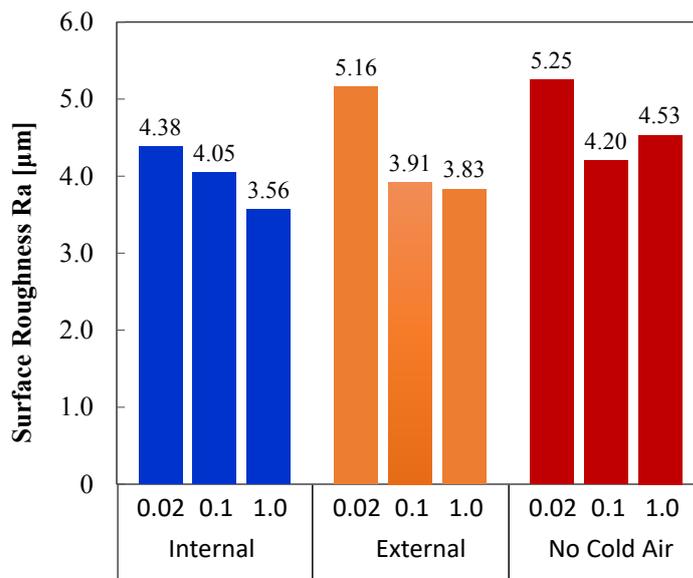


Fig. 2.21 Roundup of Surface Roughness

2.13 研削抵抗

図 2.22 に研削抵抗の方向を示す。接線研削抵抗を F_x 、垂直研削抵抗を F_y としその合力を F_{xy} とした。図 2.23 に切り込み深さが 1 mm の場合の各研削抵抗の測定結果を示す。なお示した各研削抵抗は 1 パス目の研削抵抗の絶対値の最大値である。同図(a)より、全ての条件で接線研削抵抗 F_x は負の値となった。これは切り込み深さが 1 mm と大きいため砥石の接線弧上で研削抵抗が働き、切り込み深さと砥石外径によって砥石送り方向に研削抵抗が

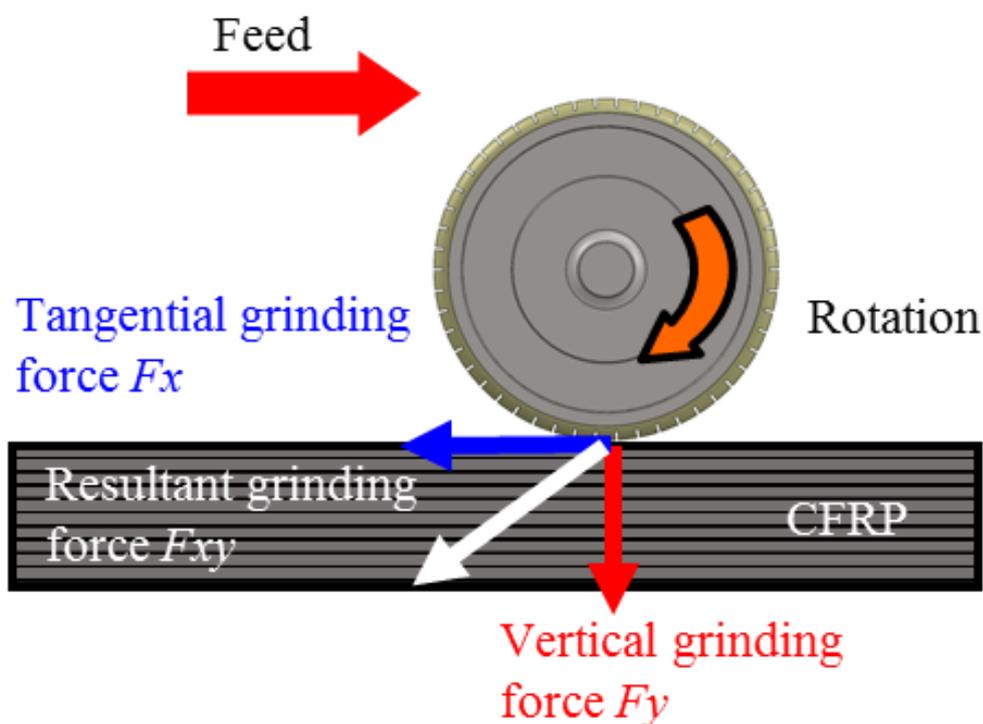


Fig. 2.22 Direction of grinding force

作用するためだと考えられる。一方、同図(b)より全ての条件で垂直研削抵抗 F_y は正の値となった。これは砥石の回転方向がダウンカットであることによって、切り込み方向に研削抵抗が働いたためであると考えられる。全ての研削抵抗において Internal と External の研削抵抗の絶対値は No Cold Air より小さくなった。これは前節で述べたように Internal と External は冷風を供給することで切りくず排出が促され、目づまりが抑制されたことによって切れ味が維持できたからだと考えられる。

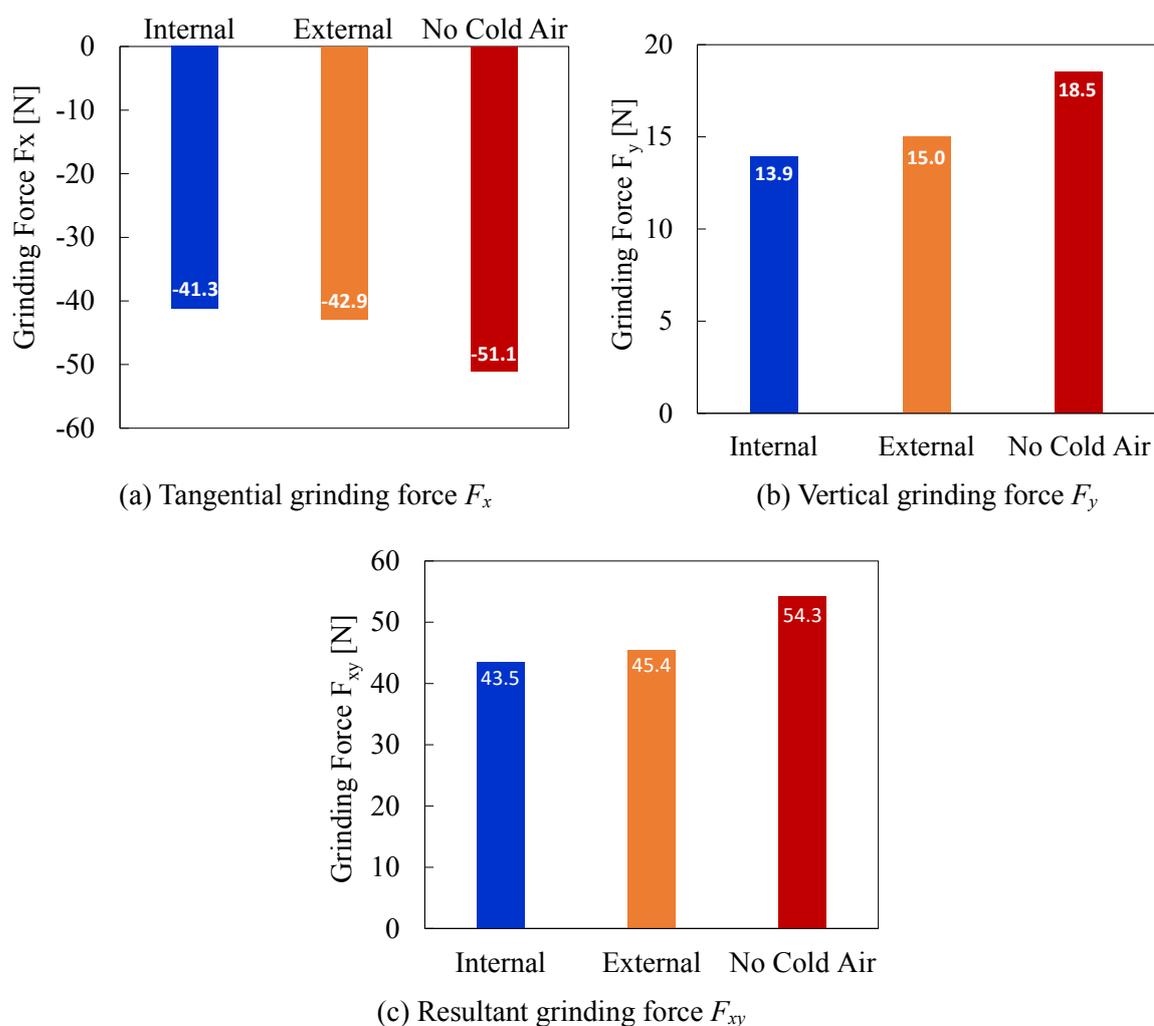


Fig. 2.23 Grinding force

2.14 加工面観察

図 2.24 に切り込み深さと冷風供給方法を変化させた 9 条件の CFRP の加工面を示す。

いずれの条件においてもバリやデラミネーションのような損傷は確認されず良好な加工面品位であった。これはダイヤモンド砥粒の切れ味が良いことや切り込み深さが 1 mm 以下であったため、研削抵抗が小さく加工物にかかる負荷が小さかったからだと考えられる。

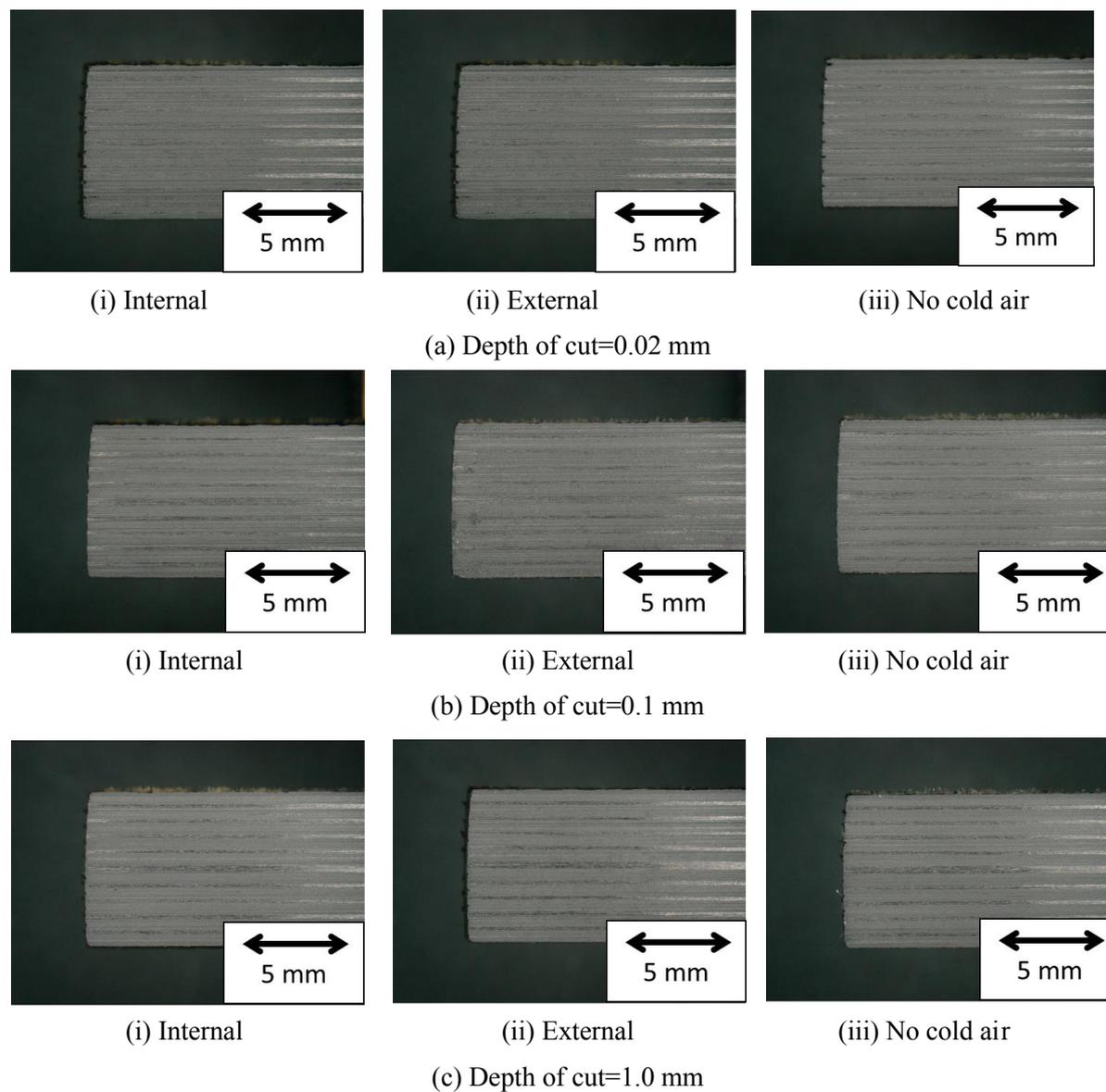


Fig. 2.24 Machined surface

2.15 まとめ

本章では冷風の供給方法を Internal, External, No Cold Air の3条件に変化させて, CFRP の端面研削を切り込み深さ 0.02, 0.1, 1.0 mm においてそれぞれ行った. そして加工点温度, 砥石の表面性状, 表面粗さ, 加工面性状, 研削抵抗の調査を行った. その結果以下のことを明らかにした.

- 1) 切り込み深さ 0.02, 0.1, 1.0 mm 全ての条件において砥石内冷風による温度低減効果を確認した. また, 切り込み深さが 1.0 mm のように大きい場合, External では行き届かない加工点にも Internal では内側から冷風を供給することで冷却可能であり, この点で Internal は優位性があることが分かった.

- 2) 砥石表面観察結果より No Cold Air と Internal を比較すると、切り込み深さが微小な 0.02 mm の場合は、砥石内冷風による砥石洗浄効果が確認されたが、切り込み深さが 0.1, 1.0 mm の場合は顕著な差はなかった。このため砥石内冷風供給の洗浄効果には限界があると考えられる。また Internal と External を比較すると、切り込み深さ 0.02 mm においては顕著な違いを確認できたが、切り込み深さ 0.1, 1.0 mm においては、ほとんど差はなかった。これより目づまり抑制効果の点における External に対する砥石内冷風の優位性は、微小な切り込み深さの場合はあるが、切り込み深さが 0.1, 1.0 mm のように大きくなると、優位性はなくなることが分かった。また表面粗さは砥石表面観察結果に追従しており、砥石の目づまりが少ない場合、表面粗さが小さい結果となった。これは砥石表面に切りくずの付着が少ない場合、加工面への干渉が少なくなるためであると考えられる。
- 3) 切り込み深さ 1 mm において全ての研削抵抗 F_x , F_y , F_{xy} は Internal, External は No Cold Air に比べて小さくなった。これは冷風によって切りくずが排出されたため切れ味が維持されたからだと考えられる。
- 4) 加工面観察結果は全ての 9 条件でバリやデラミネーションなどの損傷は確認されなかった。これは電着砥石の切れ味が良く、また切り込み深さが 1 mm と小さかったため、研削抵抗を小さく抑えることができ、加工物への負荷が小さいからだと考えられる。
- 5) Internal は、External に比べ冷却のみの単機能では顕著な差はない場合もあるが、研削液供給機構は冷却液ノズルが無く特に同時 5 軸先端点制御等で激しく砥石が動き回る場合でもノズルが加工点と干渉する可能性が全くない事に加え、加工点と砥石の間隔が狭小で冷却液が届かないタイミングでも砥石内を経由して確実に加工点に到達する優位性がある。

また本研究はセンタースルー機能が無い又は、ウエット仕様で冷風のドライが使えない工作機械であっても、砥石内を加圧された冷風が障害となる砥石の内壁のスリット溝を通り抜け加工点に確実に噴出するサイドスルー方式の新設計で同等の効果を示し、更に必要に応じウエットとドライの併用 2way も可能とした。

CFRP 加工が研究テーマであり冷風のみ止め、研削液の実験はしていないが、同じ結果になると考えている。

第3章

ノズルの設置条件が 冷風の流れに及ぼす影響

3.1 はじめに

2章の実験結果より、切り込み深さが大きくなるほど、加工点温度低減効果において砥石内冷風は優位性があることが分かった。しかし、どのように冷風が砥石のスリットから流れているかなどは明らかになっていない。また、スリットに対する冷風ノズルの角度などの設置条件なども検討する必要がある。そこで本章では、はじめに2章の実験のモデルの流体解析を行った。そしてノズルの最適な角度を砥石の周速と冷風の流速の関係から近似的に求め、その結果を用いて流体解析を行い、最適な砥石内冷風供給方法を検討した。

3.2 実験条件における流体解析

3.2.1 解析条件

前章で行った実験条件における冷風の流れを調査するため、流体解析ソフトウェア (Solid Works 社製 Flow Simulation) を用いて流体解析を行った。まず、前章の実験条件のノズル出口の冷風の流速 v_c [m/s] と砥石の回転数 N [r/min] を求める。ノズルの内径が直径 d は 10 mm であるのでノズル出口の断面積 S は

$$S = \frac{\pi}{4} d^2 = 7.85 \dots \times 10^{-5} \text{ m}^2 \quad (3.1)$$

冷風の風量 C が 784 L/min であるので冷風の流速 v_c は

$$v_c = \frac{C}{S} = \frac{4C}{\pi d^2} = 166.36 \dots \approx 166 \text{ m/s} \quad (3.2)$$

となる。また砥石回転数 N は砥石直径 $D=120$ mm, 周速 $V=20$ m/s より、

$$N = \frac{60V}{\pi D} = 3183.098 \dots \approx 3183 \text{ r/min} \quad (3.3)$$

となった。

解析は図3.1のようなモデルを用いて行った。解析条件として、重力をZ方向に 9.81 m/s^2 , 周囲の圧力を $1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$, 気温を $20 \text{ }^\circ\text{C}$ とした。また実験と同条件となるように、砥石を取り付けフランジによって連結したシャフトを、Z軸まわりに -3183 r/min で回転する移動壁とした。ノズルは固定された実在壁とし、砥石内側に向けてノズルから圧力 0.7 MPa , 温度 2°C の空気を 166 m/s の流速で供給した。なお、供給する流体はノズル出口において放射状に広がらないものとした。また2章の実験条件と同様にノズルは加工面(XY面)とな

す角が 45° , YZ 面となす角が 30° の角度になるように設置し, 供給する流体と周囲流体をいずれも空気に設定した.

Nozzle from cold air generator

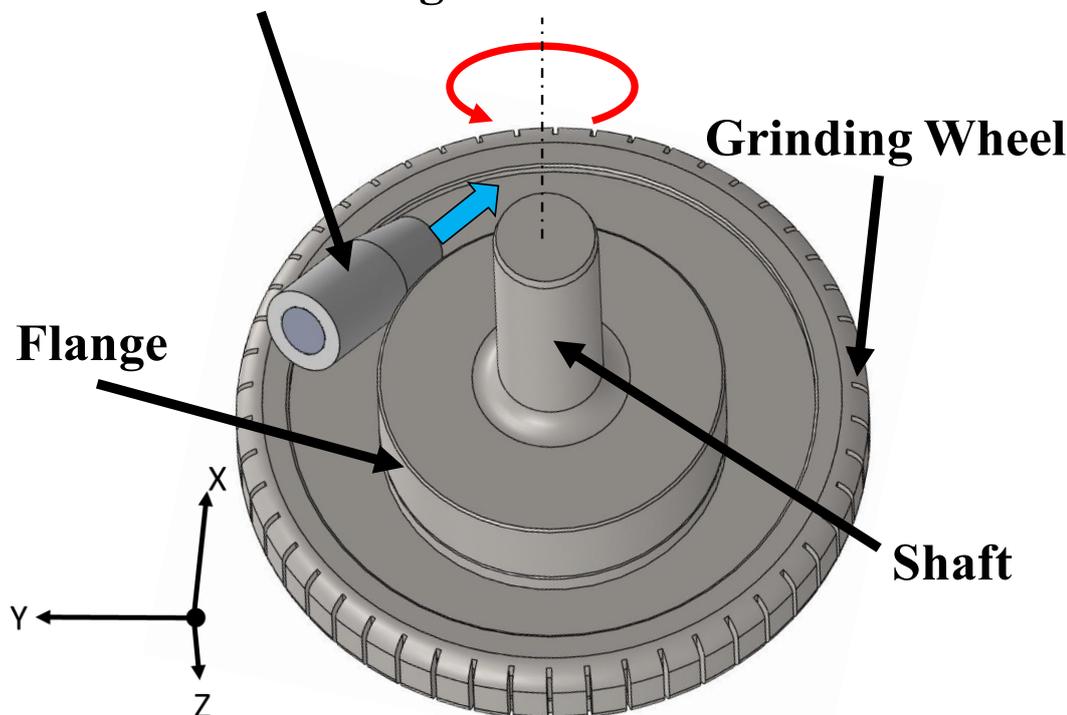


Fig. 3.1 Analysis model under experimental conditions in chapter 3

3.2.2 解析結果

図 3.2 に 2 章の実験条件における空気の流れの解析結果を示す. 冷風の流れは小さな矢印の連なりで示し, その色は流速の大きさを表している. 同図 より赤く囲んだ A の冷風噴射部付近のスリット外部において流れの矢印は砥石法線方向を向いており, 密度が他と比べ高く風量も多いことが分かる. 実験では加工点の砥石内側に向かって冷風を噴射しているため, 供給する冷風の多くは加工点に行き届いているということが分かった. 一方, 黄色で囲んだ D のような噴射部付近以外のスリット外部においても流れの矢印は存在するが, A の噴射部付近ほど密度は高くなく, 砥石法線方向より少し周速の反対側に傾いて流れ出ている. これは風量が少ないため, 砥石回転による流れによる影響を受けているからだと考えられる. また, 緑で囲んだ B の部分において, スリットを通らず砥石上部から抜けていく流れがあり, この流れは加工に関わらないため, 供給する冷風の損失であると考えられる.

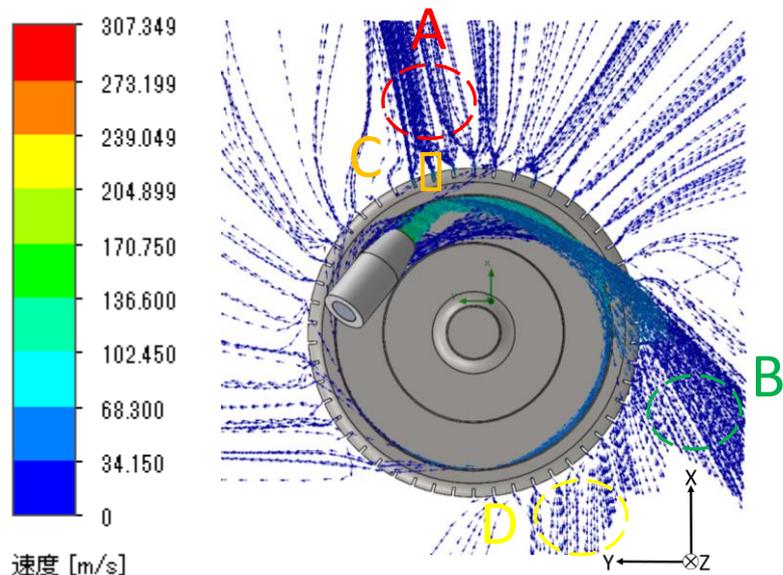


Fig. 3.2 Analysis results under experimental conditions in chapter 3

図 3.3 に図 3.2 において橙色で囲った C のスリットにおける冷風の流れの様子を示す。図 3.3 より、冷風はスリット出口から砥石接線方向に流れず、スリット外に向かって砥石法線方向に流れていることが分かる。したがって砥石内側から供給された冷風はスリット内を通り砥石法線方向に流れ出て行くが、砥石接線方向(砥石外周面)には流れないため、砥石外周面の砥粒には直接行き届かないと考えられる。これは 2 章の砥石内冷風による切りくずの洗浄効果に限界があった結果の要因のひとつであると考えられる。

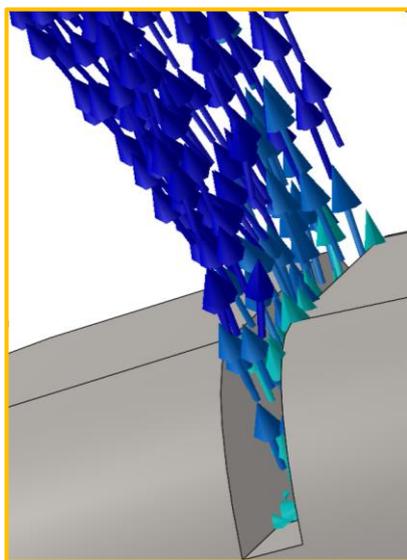


Fig. 3.3 Flow in slit

次に, 図 3.4 において砥石幅の中心における XY 面の冷風の流速コンター図を示す. スリット入口付近と比べ, 出口において流速が低下していることが分かる. この結果については計算で求めた角度における解析結果と比較して後述する.

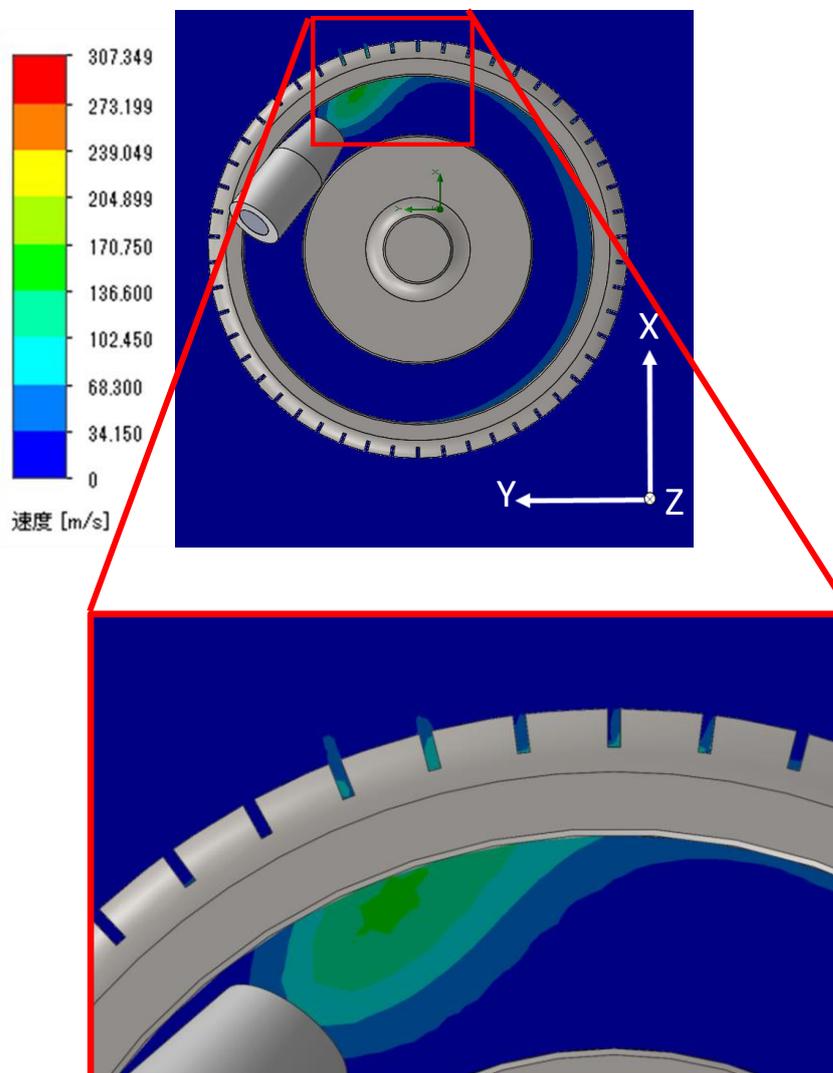


Fig. 3.4 Cold air speed contour map under experimental conditions in chapter 3

3.3 最適な冷風ノズル角度の近似的計算

冷風ノズルの最適な角度を求めるため近似的な計算を行った. 最適なノズル角度の条件として一つのスリットに注目し, スリットの内面に当たることなく通り抜ける冷風が最も多い場合とした. 図 3.5 にその概要を示す. なお簡略化のためノズルの側面は常時 XY 面に平行とし, YZ 面となす角度のみを検討した. 砥石の周速度を V , 冷風の風速を v_c , 冷風のスリットに入る角度を θ , スリットの幅を k , 深さを h とした.

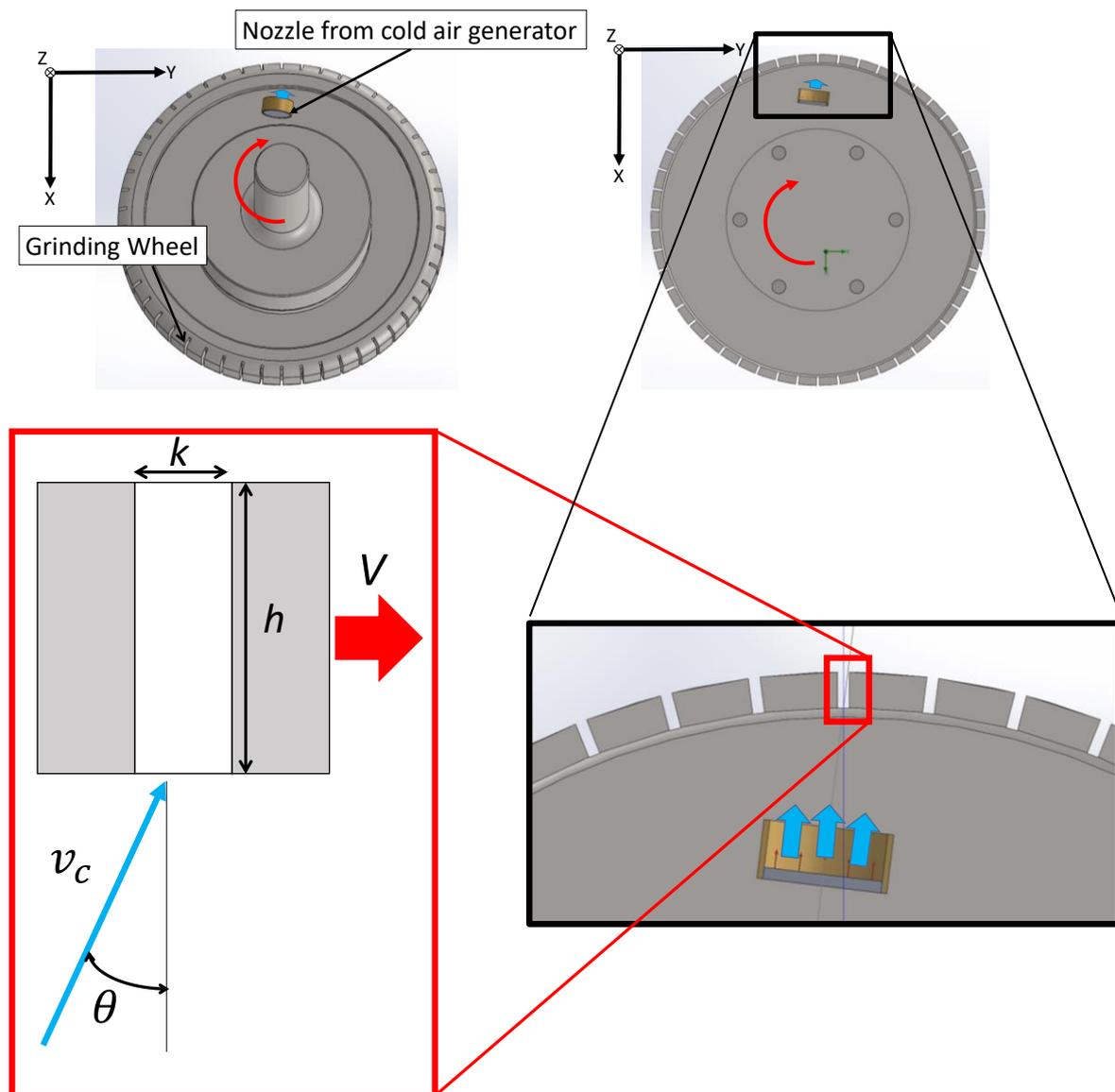


Fig. 3.5 Grinding Wheel and nozzle of cold air

図 3.6 に一つのスリットに注目し、冷風がスリットに入り出て行くまでの微小時間 ΔT にスリットが移動している様子を示す。冷風のスリットの入口に入り、出る時間は微小時間であるため図のように右から左へ直線上に周速 V でスリットは移動すると考えた。なお、図 3.6 のようにスリットの各点(a, b, c, d)は微小時間 ΔT 後にそれぞれ各点 (a', b', c', d')に移動するとする。

冷風の流速 v_c を砥石接線方向の流速 $v_c \sin \theta$ と砥石法線方向の流速 $v_c \cos \theta$ に分けて考える。ここで周速と冷風の流速の関係から2つに場合分けをする。

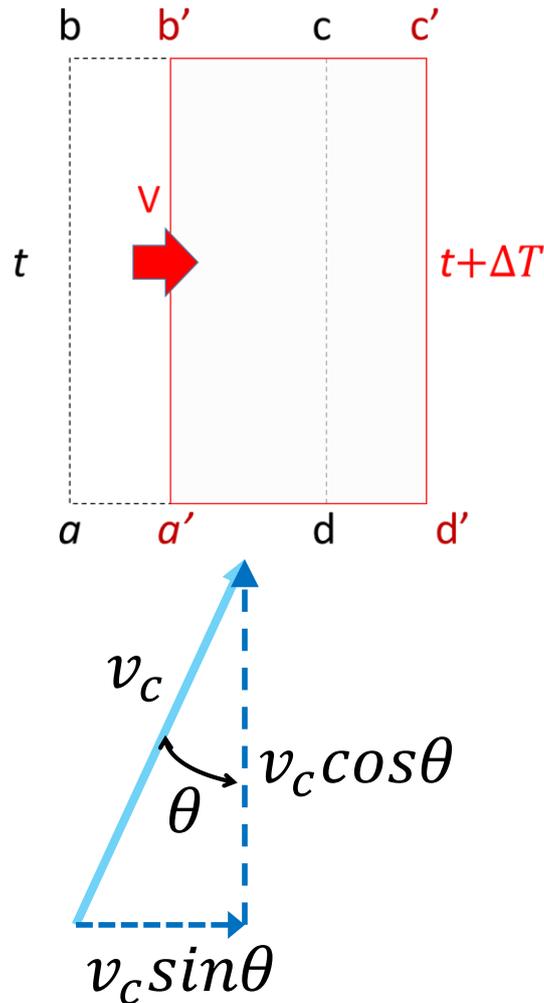


Fig. 3.6 Schematic of cold air passing through slit

① 冷風の砥石接線方向の流速 $v_c \sin \theta$ が周速 V より遅い場合 ($v_c \sin \theta < V$)

図 3.7(a)に冷風の砥石接線方向の流速 $v_c \sin \theta$ が周速 V より遅い場合の冷風の最大入口長さを示す. スリット内面に当たらず冷風が通ることが条件であるため, スリットの入口で a から d の範囲内に冷風は入らなくてはならない. また, 最大入口長さを求めるには, この範囲内(a - d)において冷風がスリット内面に当たらず通過可能なスリット入口の最も右端の点と最も左端の点を求める必要がある.

砥石接線方向の流速が周速より遅いため, a からスリットに入った場合, 途中でスリット内面に追いつかれ当たってしまう. したがって, 最大入口長さの右端は ΔT 後に b' に到達する冷風の軌跡と a - d の交点である. また左端は冷風がスリット内面を追い越すことはないので d となる. よって冷風がスリット内面に当たらず通過する最大入口長さ A は図 3.7(b)より $k - V\Delta T + h \tan \theta$ となる. なお, ΔT は冷風がスリットに入り, 出るまでの時間であるので, 式(3.4)のようになる.

$$\Delta T = h/v_c \cos \theta \tag{3.4}$$

よって最大入口長さ A は式(3.5)のようになる.

$$A = k - Vh \frac{1}{v_c \cos \theta} + h \tan \theta \tag{3.5}$$

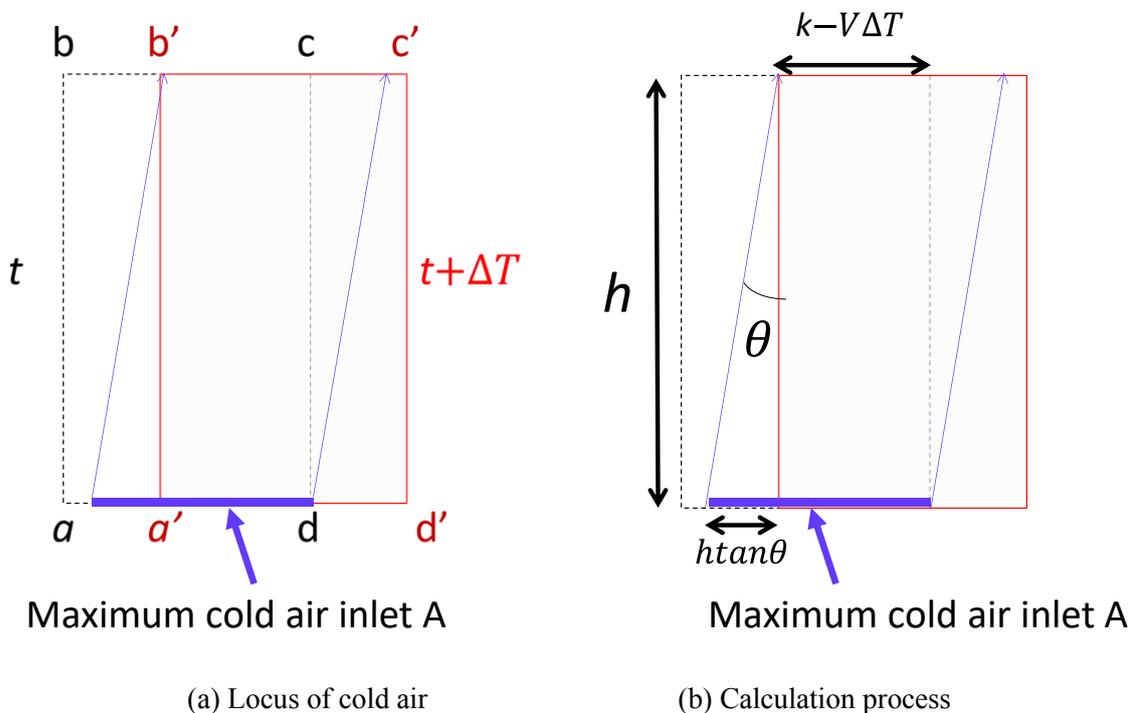
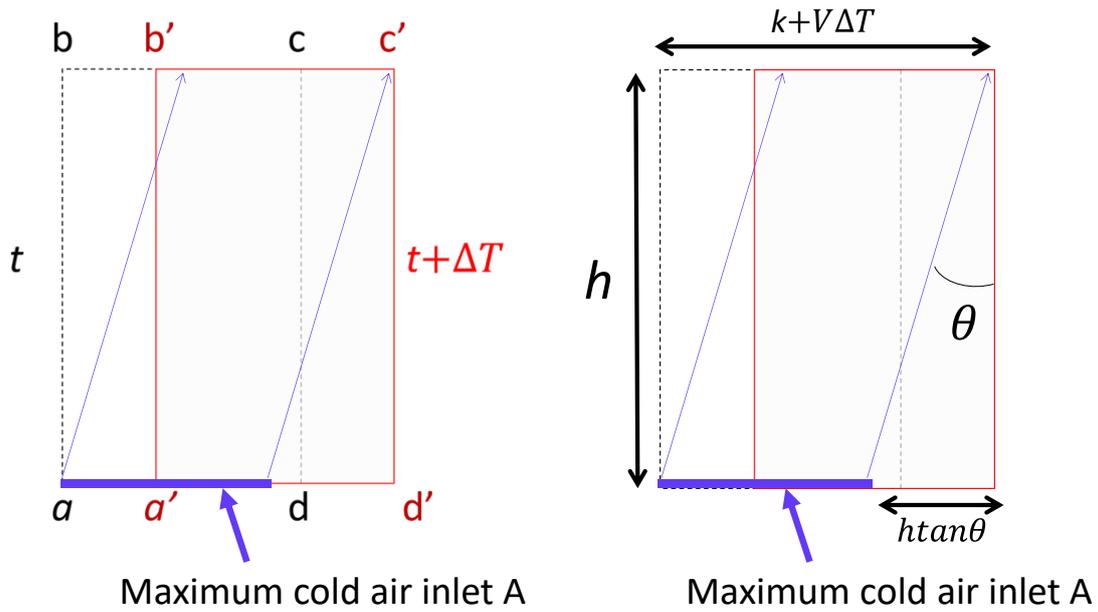


Fig. 3.7 Maximum cold air inlet ($v_c \sin \theta < V$)

② 冷風の砥石接線方向の流速 $v_c \sin \theta$ が周速 V より速い場合 ($v_c \sin \theta > V$)

図 3.8(a) に冷風の砥石接線方向の流速 $v_c \sin \theta$ が周速 V より速い場合の冷風の最大入口長さを示す。冷風の砥石接線方向の流速が周速より速いので、スリット内面に冷風が追い付かれることはないため、最大入口長さの右端は a である。一方、左端を d にすると冷風がスリット内面を追い越してしまうため、 ΔT 後に c' に到達する冷風の軌跡と $a-d$ の交点である。よって冷風がスリット内面に当たらず通過する最大入口長さ A は図 4.8(b) より $k + V\Delta T - h \tan \theta$ となる。式(4.4)より最大入口長さ A は以下の式(3.6)になる。

$$A = k + Vh \frac{1}{v_c \cos \theta} - h \tan \theta \tag{3.6}$$



(a) Locus of cold air

(b) Calculation process

Fig. 3.8 Maximum cold air inlet ($v_c \sin \theta > V$)

3.2.1 節で求めた流速 $v_c=166$ m/s と実験条件の周速 $V=20$ m/s を式(3.5)と式(3.6)に代入して導いた最大冷風入口長さ A とノズル角度との関係を図 3.9 に示す. 図 3.9 より最大冷風入口長さが最大となるノズルの角度は $v_c \sin \theta = V$ を満たす角度である. v_c と V を代入し, ノズルの角度 θ_{max} を求めると

$$\theta_{max} = \sin^{-1}\left(\frac{V}{v_c}\right) = 6.919 \dots \approx 6.9^\circ \tag{3.7}$$

となった.

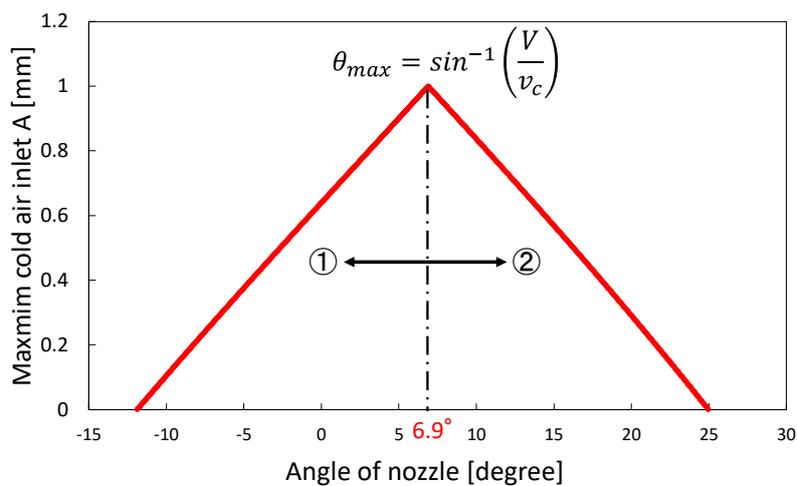


Fig. 3.9 Relationship between maximum cold air inlet and angle of nozzle

3.4 求めた最適なノズル角度の流体解析による検証

3.4.1 解析条件

解析は図3.10のようなモデルを用いて行った。解析条件は重力をZ方向に 9.81 m/s^2 、周囲の圧力を $1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、気温を $20 \text{ }^\circ\text{C}$ とした。また砥石を取り付けフランジによって連結したシャフトをZ軸まわりに -3183 r/min で回転する移動壁とした。そしてノズルは固定された実在壁とし、砥石内側に向けてノズルから圧力 0.7 MPa 、温度 2°C の冷風を 166 m/s の流速で供給した。なお、同図のようにノズル出口とスリットの冷風入口までの距離は全条件 17 mm とし、ノズル角度 θ はスリットの入口の垂直線を基準に時計回り側を正、反時計回り側を負とした。また供給する流体と周囲流体をいずれも空気に設定した。3.3節で求めたノズルの角度の計算結果をもとに、最も冷風入り口長さAの大きい 6.9° 、Aが0となる 25° と -12° 、冷風がすべてスリット内面にあたる 45° と -45° の5つの角度において流体解析を行った。

Nozzle from cold air generator

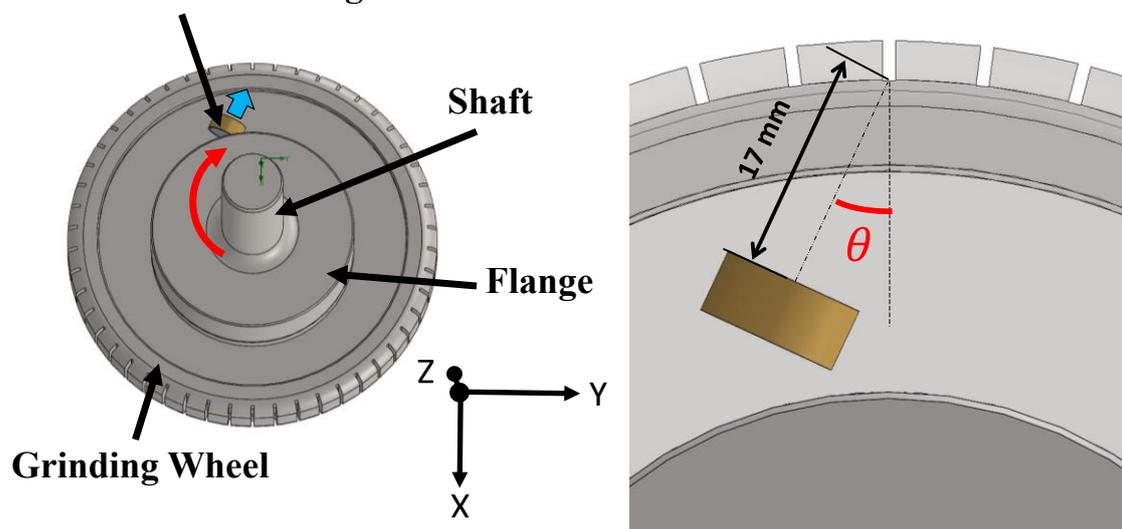


Fig. 3.10 Analysis model

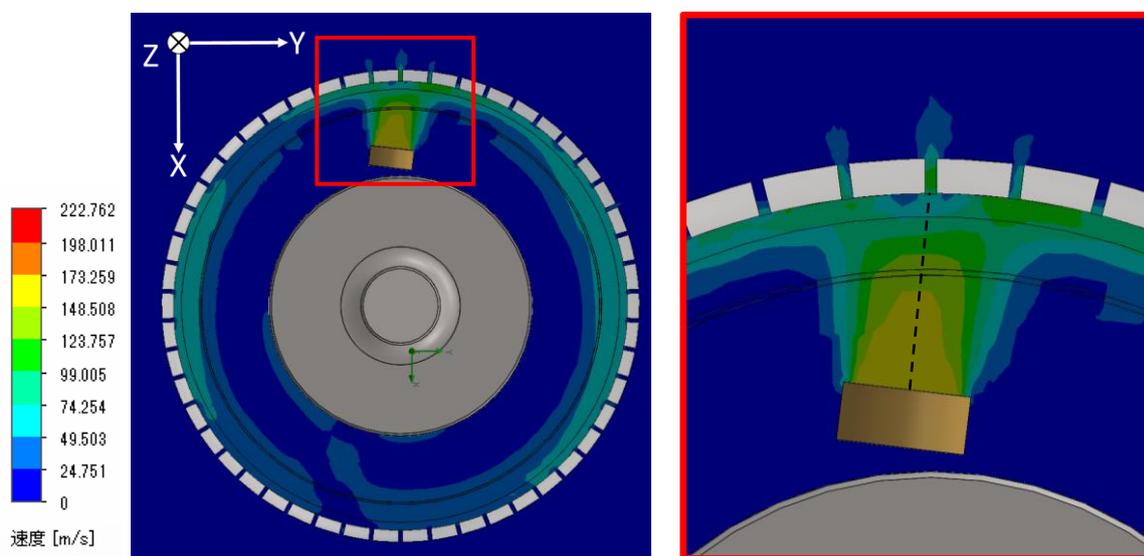
3.4.2 解析結果

図3.11に 6.9° 、 -12° 、 25° 、 -45° 、 45° 5つのノズル角の条件における流速コンター図を示す。なお本節は各図の点線の先にあるスリットの入口と出口付近の流速分布に注目し比較する。

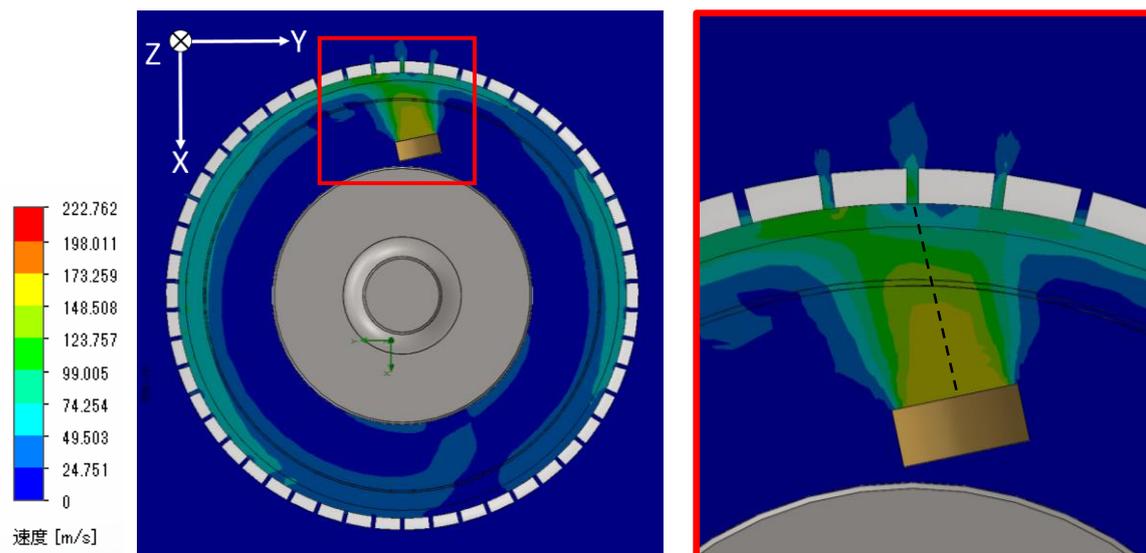
図3.4の実験条件の場合、冷風はスリット入口のときと比べ出口では流速が低減していたが、図3.11(a)のノズル角 6.9° においては、スリット出口を出た少し先まで入口時の流速が維持されていることが分かる。図3.11(b), (c)の冷風入り口長さAが0となるノズル角 -12° と 25° のときのコンター図を見てみると、ノズル角が -12° はノズル角度 6.9° と同じような流速分布である。一方、ノズル角が 25° の場合、 -12° と 6.9° ほどスリット出口の先まで流速が維持されていないことが分かる。この差は回転方向の違いに起因すると考えられ

る. -12° の場合, 砥石内面の回転によって発生する流れと逆方向に冷風は流れており, その回転による流れの影響で, 冷風のスリットに入る角度が -12° より大きくなり, 図 3.9 より冷風入口長さ A が大きくなったため, 6.9° と近い分布になったと考えられる. 逆にノズル角が 25° の場合は, 冷風の流れる方向と同じ方向に, 砥石内面の回転による流れがあり, 冷風のスリットに入る角度が 25° より大きくなったため, 図 3.9 より冷風入口長さ A が小さくなり, ノズル角 -12° ほどスリット出口まで冷風の流速が維持されなかったと考えられる. 最後に図 3.11(d), (e)の計算上, 全ての冷風がスリット内面にあたる -45° と 45° のときのコンター図を見てみると, 2章の実験条件と同じように, 入口での冷風の速度は出口まで行くと低下している結果となった. この結果は理論通りとなった.

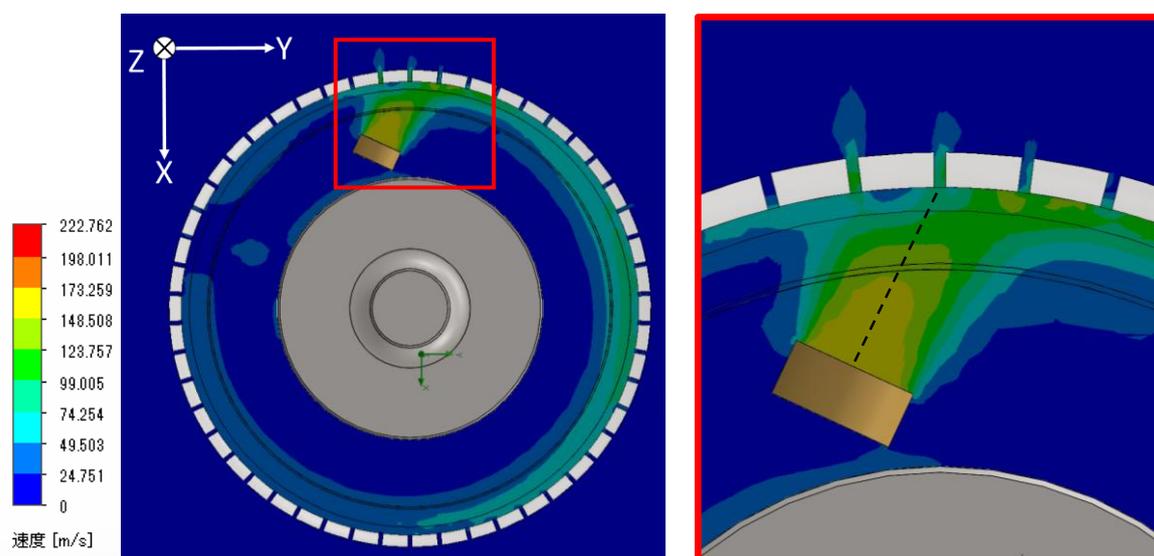
これらの結果より, 6.9° は真の最適な角度ではないと考えられる. これは近似的に最適なノズル角度を計算したことと, 前述した回転によって発生する砥石の内側の流れの影響が無視できないからであると考えられる.



(a) Angle of nozzle = 6.9°



(b) Angle of nozzle = -12°



(c) Angle of nozzle = 25°

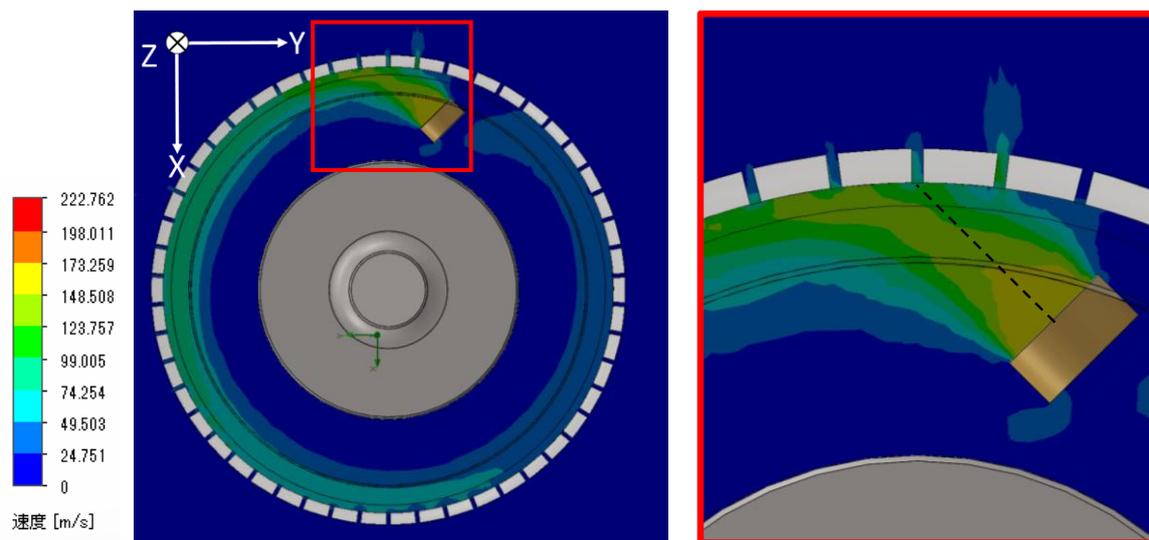
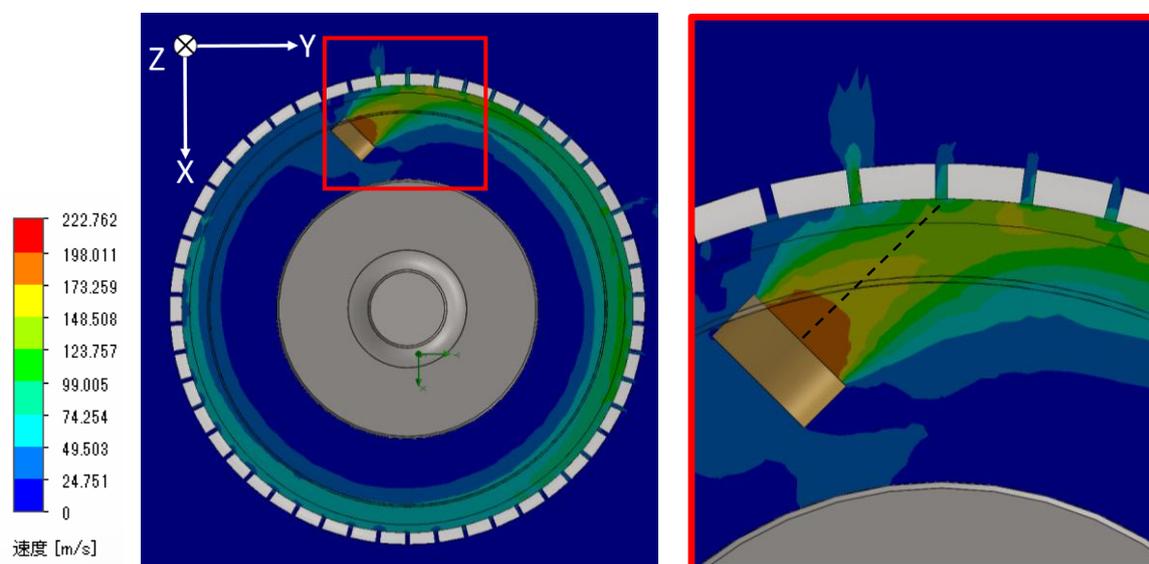
(d) Angle of nozzle = -45° (e) Angle of nozzle = 45°

Fig. 3.11 Cold air speed contour map changing angle of nozzle

3.5 まとめ

本章では、はじめに実験条件のモデルにおける流体解析を行った。その結果、噴射部付近のスリットから流れ出る冷風の風量が砥石周りの流れの中で最も多かったため、実験においても供給した冷風の多くは加工物へ供給できていたと考えられる。また、冷風はスリット出口から砥石法線方向に流れ出ており、砥石接線方向(砥石外周面)には流れていないことが分かった。これは2章の砥石表面観察における砥石内冷風の切りくず排出効果に限界があったことの要因の一つであると考えられる。そして近似的に最適なノズル角度を計算で導き出し、その角度を用いて流体解析を行ったが、真の最適なノズル角度は明らかに

できなかった。

また、使用した流体解析ソフトウェアの限界もあるが、冷風と流路において、砥石内壁厚さ、高さ、形状、回転速度、材質、スリットの幅、高さ、数、間隔、冷風の圧、流量、流速、スリットから穴にした場合、その併用の場合、ノズルの数と位置及び角度、出口付近の対称物の形状の他、接触、非接触、その間隔、全開放など多くのパラメータはあるが、本研究では新設計したサイドスルー砥石からの冷風の **Internal** 方式が、**External** と同等で砥石内供給機構を持つ優位性を示したので、基礎実験としてワンパターンに止め他の条件は確認していない。

第4章

赤外線放射温度計を用いた研削面の温度測定手法の提案

4.1 はじめに

研削加工は円盤状の研削砥石を高速回転させて、工作物を削り取る加工手法である。切削加工と比較すると除去能率は劣るが、高い寸法精度や形状精度、また高い仕上げ面粗さを得ることができ、精密仕上げに用いられることも多い。研削加工の大きな課題として、加工中の発熱が挙げられる。過度な発熱は熱変形による寸法誤差や、研削焼けによって加工面品質や材料強度が低下する問題がある。そのため、加工中の温度のモニタリングは理想的な加工結果を得る上で重要である。

本章では、はじめに、提案する赤外線放射温度計を用いた研削面の新しい温度測定手法の測定原理、従来の温度測定手法に対する優位性について述べる。そして黒体炉を測定対象として提案手法を適用し、主軸回転速度に対する測定温度波形の応答性について検証する。

4.2 赤外線放射温度計を用いた研削面の温度測定

4.2.1 測定原理

図4.1, 4.2に提案する温度測定手法のセットアップと測定原理を示す。赤外線放射温度計の光路用に外周面に小穴を設けた電着砥石を工具として使用した。加工対象、砥石、赤外線放射温度計の順に配置し、砥石の2つの小穴から研削面の温度を測定する。あるいは赤外線温度計の測温部が砥石の外周面に位置する場合は、砥石表面の温度を測定する。なお、加工対象と砥石表面では放射率が異なるため、砥石表面温度を出力するには、砥石表面の放射率で出力値を換算する必要がある。

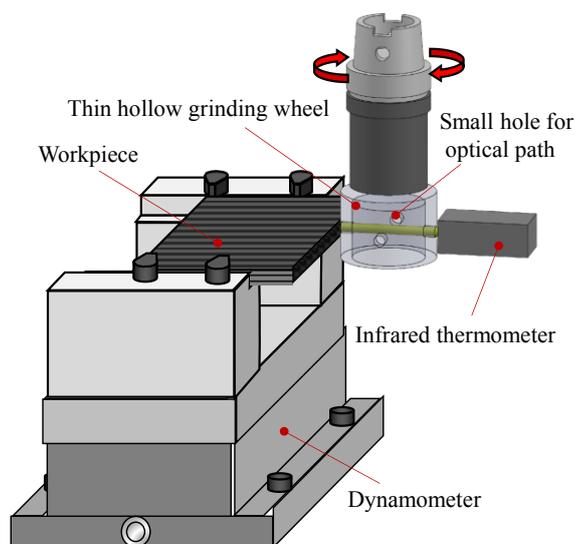
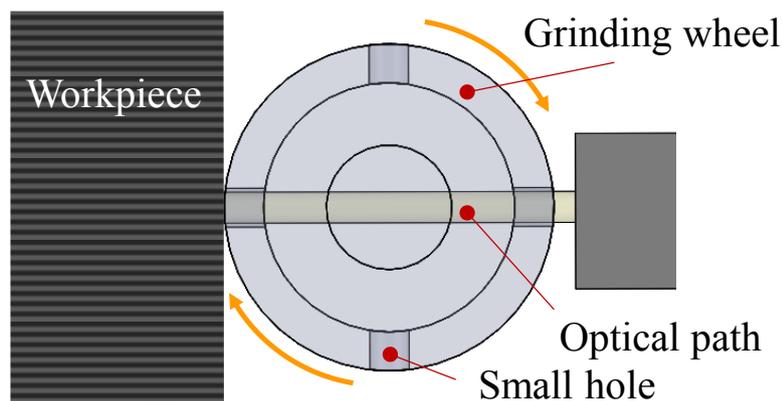
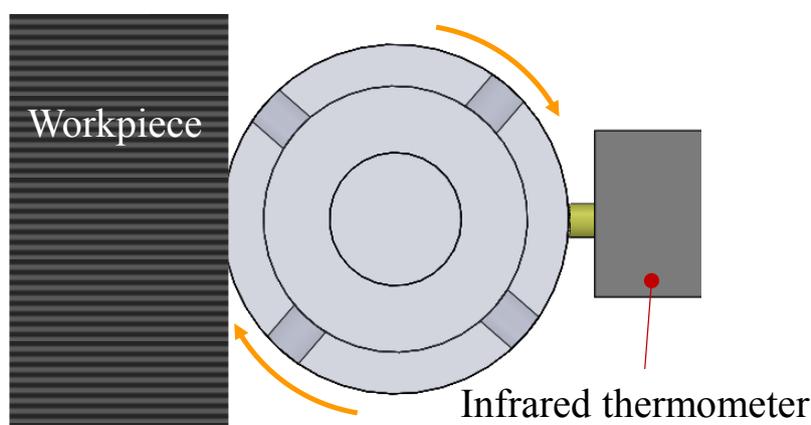


Fig. 4.1 Proposed temperature measurement set up with infrared thermometer



(a) Measurement on grinding surface



(b) Measurement on grinding wheel

Fig. 4.2 Measurement concept

4.2.2 従来の温度計測手法に対する優位性

従来、温度計測手法として熱電対による方法、赤外線放射温度計による方法が報告されている。熱電対を用いる場合、図 4.3 に示すように、熱電対を工作物もしくは砥石内に埋め込む必要がある。一般に時間的分解能、空間分解能共に高い測定が可能となり、研究上は非常に有用である。一方で生産ラインでのデータ収集を想定した場合には、すべての加工対象に熱電対を埋め込むことは現実的ではない。砥石に埋め込むことについても、実用化には課題が残る。

他方、赤外線放射温度計は表面に露出した部分の赤外線を検知することにより、温度測定が可能である。サーモグラフを用いれば、容易に“見える部分”の温度分布が測定可能である。しかし、砥石と工作物の接触部のような“見えない部分”の測定はできない。光ファイバを通して内部の温度を測定した例はあるが、生産ラインで工作物側に設置することは現実的ではない。

それに対して、提案手法では、砥石に小穴を設けることにより、砥石回転中のごく短時間であるが、接触弧領域もしくは加工直後の加工面の温度をインプロセスで測定可能で

ある。砥石に小穴を設けることは必要となるが、工作物へ与える影響は小さいと想定され、また、赤外線放射温度計のセンサー類は自動車の自動運転化にともない安価な小型高性能化が今後飛躍的に進む予想もあり、生産ラインへ組み込んで使用することが十分可能であると考えられる。

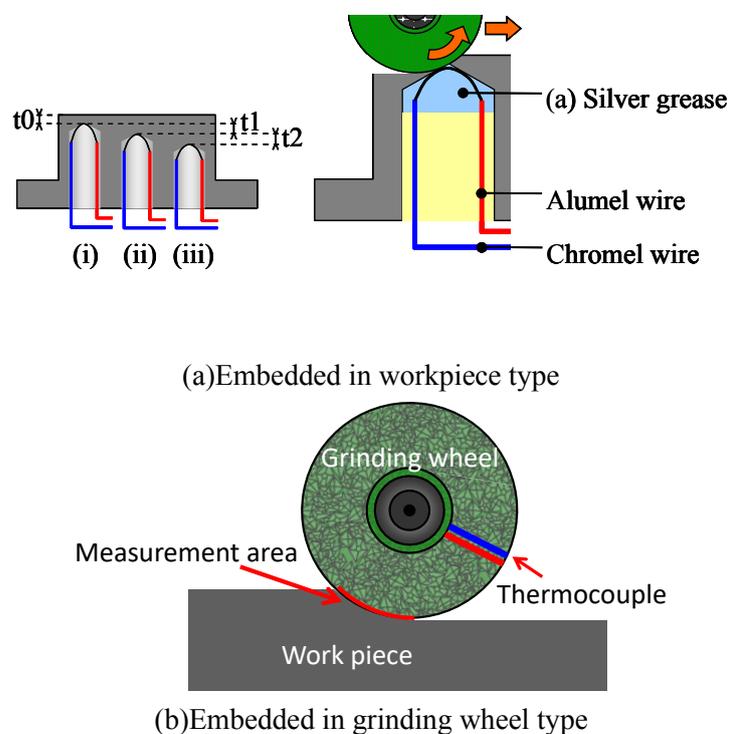


Fig. 4.3 Conventional temperature measurement with the thermocouple

4.3 黒体炉を用いた動作特性の検証

4.3.1 マシニングセンタ

本研究では、マシニングセンタ（ヤマザキマザック FJV-250 UHS）を用いて、提案手法の動作特性の検証、試験片の溝加工、研削加工実験を行った。マシニングセンタの外観を図4.4に示す。



Fig. 4.4 Machining center

4.3.2 赤外線放射温度計の温度測定

使用した赤外線放射温度計(ジャパンセンサー TMHXSCUN500-0100E008-1007)の仕様は表 4.1 のとおりである。温度測定範囲は 30~500 °C であり、応答時間は 100 μ s である。図 4.5 に光路図を示す。赤外線放射温度計の測温部のサイズはセンサと測定対象物の距離によって変化する。以降の実験では測定対象とセンサ間の距離は 100 mm に固定した。なお、この距離における測温部のサイズは $\phi 8$ である。

表 4.2 に赤外線放射温度計による温度測定の測定条件を示す。赤外線放射温度計から出力された電圧値を、高速アナログ計測ユニット(KEYENCE NR-HA08)に入力し、これをさらにパソコンに入力して、観測ソフト(WAVE ROgger PRO)を用いて温度データを取得した。

Table 4.1 Infrared radiation thermometer specifications

Measurement wavelength	μ m	2.0~6.8
Measurement temperature range	$^{\circ}$ C	30~500
Response time	μ s	100
Measurement distance	mm	100
Temperature measurement target	mm	$\phi 8$

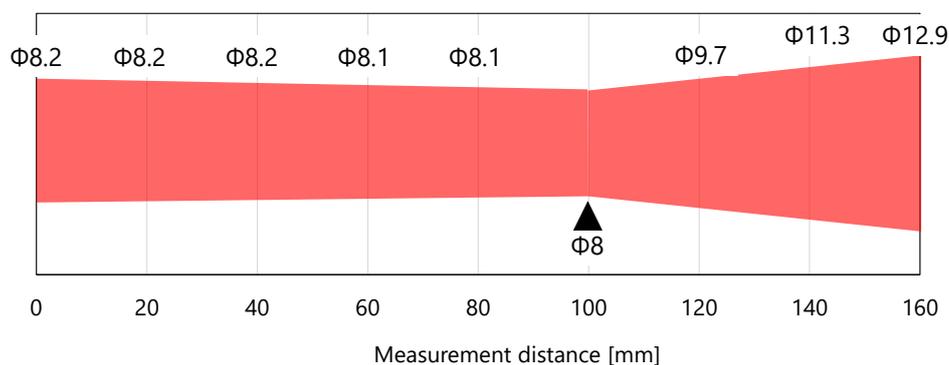


Fig. 4.5 Optical path map

Table 4.2 Measurement conditions of temperature with infrared thermometer

Measuring unit	NR-HA08(KEYENCE)	
Maximum sampling frequency	kHz	200
Sampling frequency	kHz	50
Resolution	Bit	14
Range	V	± 1

4.3.3 開口面積と赤外線のセンサへの入射量の関係

測温標的サイズが $\phi 8$ mm の円であるので、均熱体からの赤外線が測温標的サイズ全体に入射するとき、ターゲットの温度が正しく測定される。実際には回転する小穴を通してタ

ターゲットからの赤外線がセンサに入射するため、センサからの出力は、ターゲットとセンサ間の開口面積に依存する。すなわち、図 4.6 に示すように砥石に設けた工作物側とセンサ側の二つの小穴の重なり具合により定まる。ピンクの円が二つの小穴を、ブルーの破線円が测温領域を示す。なお同図ではセンサ側の小穴の方がセンサとの距離が近いいため、サイズは大きくなっており、砥石の厚みの影響は無視している。二つの小穴が重なり始めると同図(b)のようにセンサへの入力が増加し、(c)の 100%の入射状態を経て、(d)(e)のように入射量が減少していく。

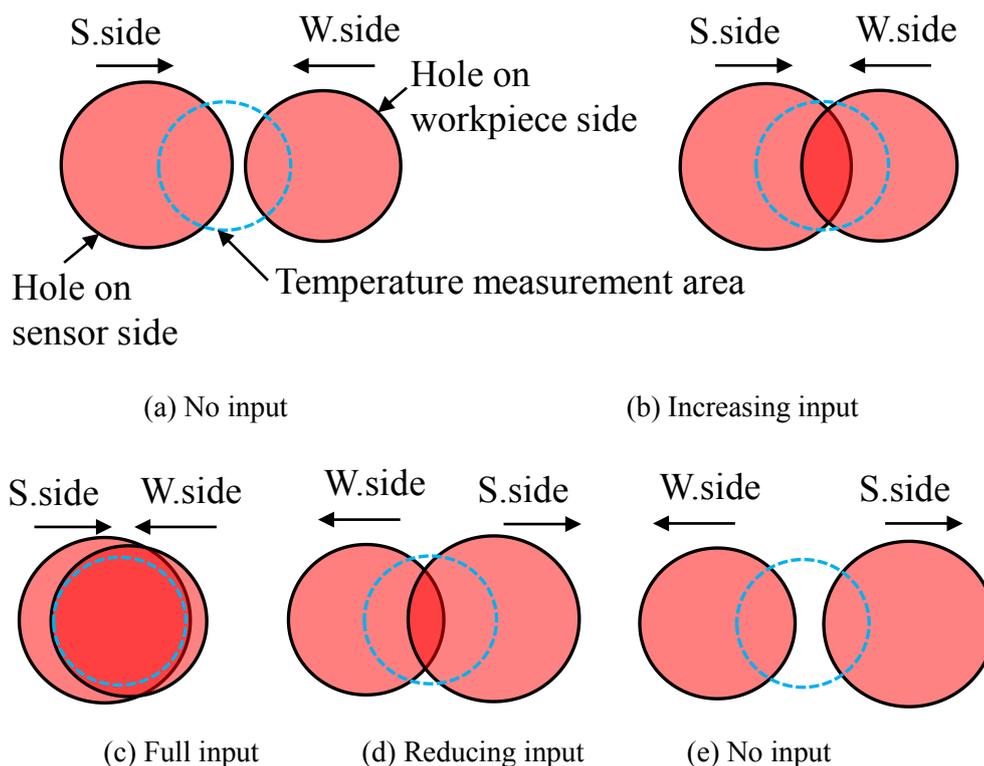


Fig. 4.6 Transition of input to infrared sensor through two holes on the grinding wheel

4.3.4 光路用の小穴付き電着砥石

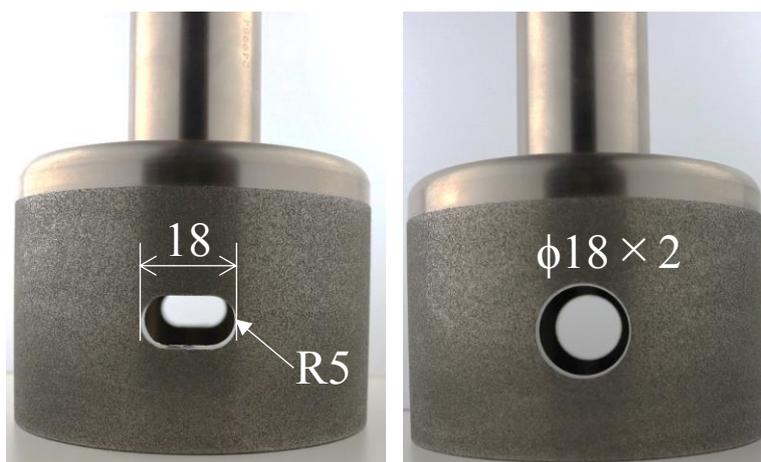
2つの小穴の重なり具合によってセンサへの赤外線の入射量が変化するため、砥石の小穴のサイズと形状によって出力される温度波形は変化することが予測されるため、これらを変化させた2種類の砥石を用意した。図 4.7 に各砥石を示す。外径 84 mm、内径が 64 mm の中空のカップ形状の合金に粒度#100 のダイヤモンド砥粒が電着されており、外周面に工具軸の垂直線上に 90° 間隔で小穴を 4 つ設け実験の効率から対の 2 つを 2 セット計 4 つとしている。各砥石の小穴の形状は Type A は $\phi 10$ の小穴が 4 つ、Type B は $\phi 18$ の小穴と長径が 18 mm の長い丸穴がそれぞれ 2 つずつ設け計算上の $\phi 8$ に余裕をもたせたオーバーサイズ $\phi 10$ とした。将来的には、測定器、アンプ、送信装置など小型化し砥石内部に配置したスマート工具ホルダーを想定しているため中空形状にしている。

赤外線の乱反射対策として砥石中空内部の塗装または光路を覆うチューブ状の構造が

考えられるが、本研究は仮定した測定原理の確認段階では使用する赤外線放射温度計の性能も加味し支障なしとして進めた。



(a) Type A



(b) Type B

Fig. 4.7 Grinding wheel

4.3.5 実験方法

図 4.8 に黒体炉の温度を測定したセットアップを示す。本章では提案する新手法の基本的な動作特性を検証するため、300 °Cに均熱した黒体炉(ジャパンセンサー BBZ5-30W500)を測定対象とし、主軸回転速度に対する測定温度波形の応答性について調査した。黒体炉を対象とした測定は、実際の研削加工中の加工温度の測定とは異なり、測定対象物の温度は設定温度で正確に保たれており、また切りくずによって測定が妨げられる影響がないため、回転する砥石の 2 つの小穴を通して、正しく温度が測定できるかを検証することが可能である。

実験条件を表 4.3 に示す。また図 4.9 に光路が砥石の小穴の中心を通過する瞬間の、光路と砥石の位置関係の概略図を示す。開口面積が測温標的サイズ以上となる開口時間 t_0 は式

(4.1)で求めることができる. ここでは図 4.9 の位置から光路の一部が欠けるまでの砥石の回転角度である開口角を θ [deg], 主軸回転速度を R [r/min]としている. なお, 図 4.6(b), (d) に示したとおり, 開口面積が测温標的サイズ以上となる時間の前後においても, センサに入力する時間は存在し, 工作物側の穴のみからセンサに入力する場合に比べて, 温度変化が急峻になることは注意されたい. 各砥石, 主軸回転速度における開口時間 t_0 [μ s]の計算結果を表 4.4 に示す. 主軸回転速度を, 応答時間 100 μ s に対して, いずれの砥石も開口時間が十分に取れている 1000 r/min, 直径 84 mm の電着砥石で推奨される主軸回転速度の範囲内である 4500 r/min, Type A の砥石の場合, 開口時間が 58.8 μ s となり, 応答時間を下回る, 高速の 7000 r/min の 3 パターンに変化させて実験を行った.

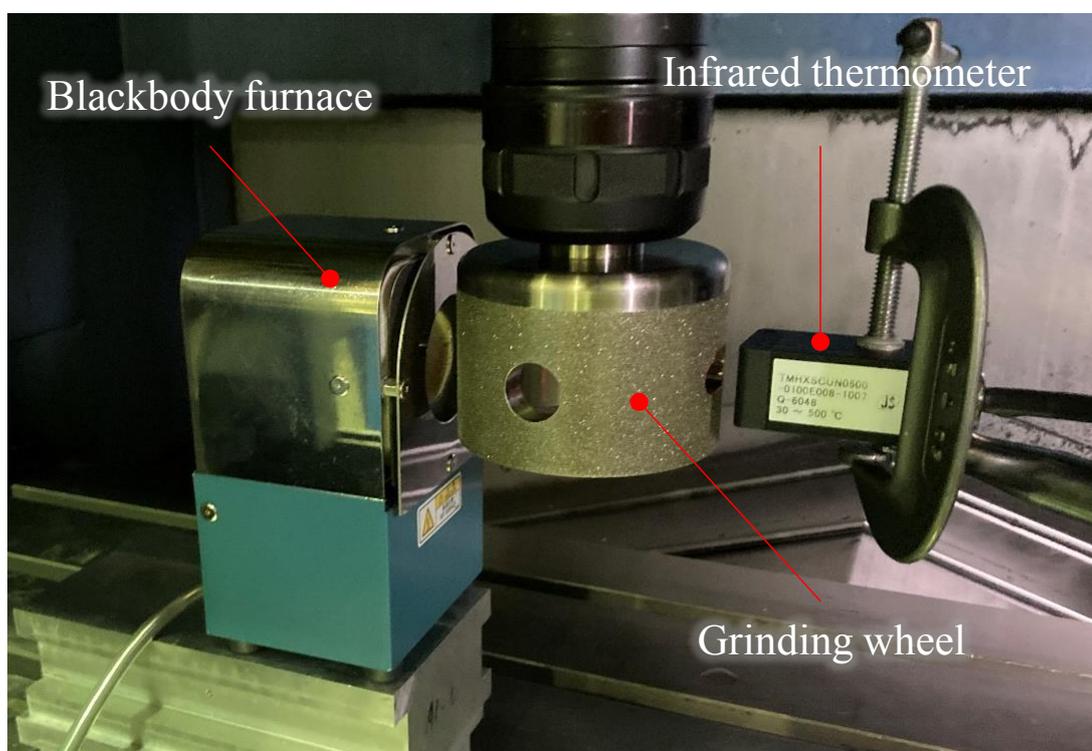


Fig. 4.8 Set up for measuring temperature on blackbody furnace

$$t_0 = \frac{2 \times \theta \times 60 \times 10^6}{360 \times R} \quad (4.1)$$

Table 4.3 Experimental conditions

Grinding wheel	Type A, Type B	
Measurement distance	mm	100
Temperature of blackbody furnace	°C	300
Spindle speeds	r/min	1000, 4500, 7000

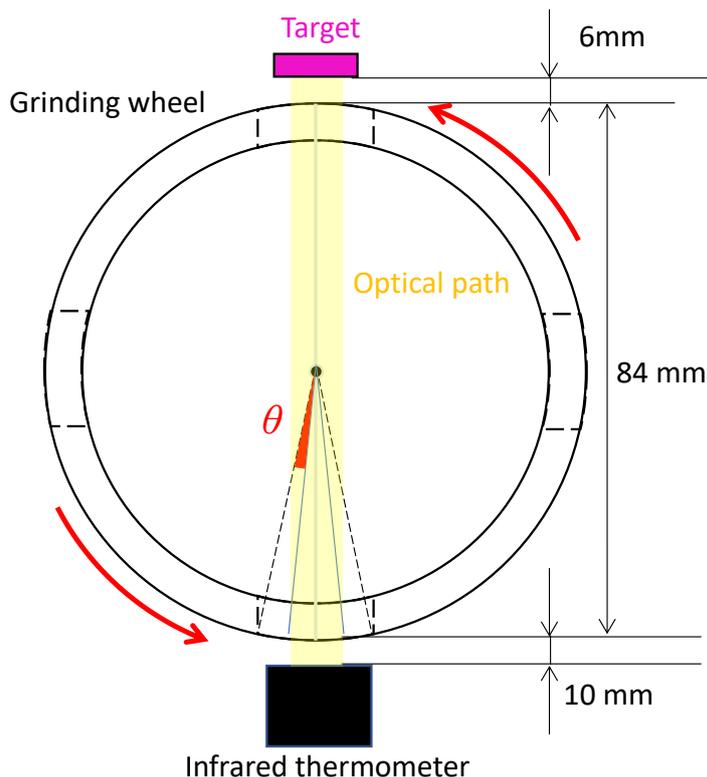


Fig. 4.9 Aperture angle of grinding wheel

Table 4.4 Opening time for each grinding wheel and spindle speeds

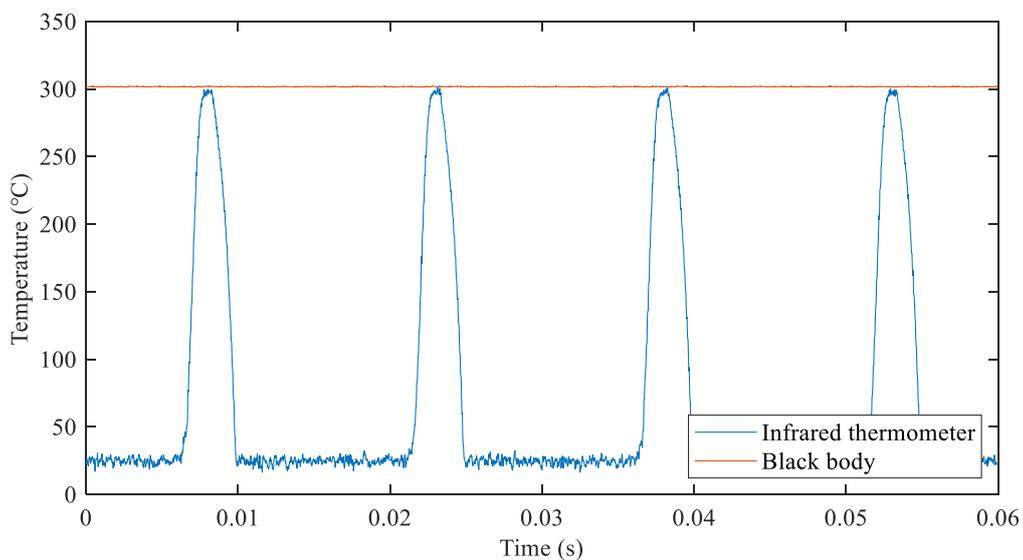
Grinding wheel	Type A (φ10)	Type B(φ18)
Aperture angle θ [deg]	1.24	6.77
Spindle speeds R [r/min]	Opening time t_o [μ s]	
1000	411.7	2256.7
4500	91.5	501.5
7000	58.8	322.4

4.3.6 実験結果

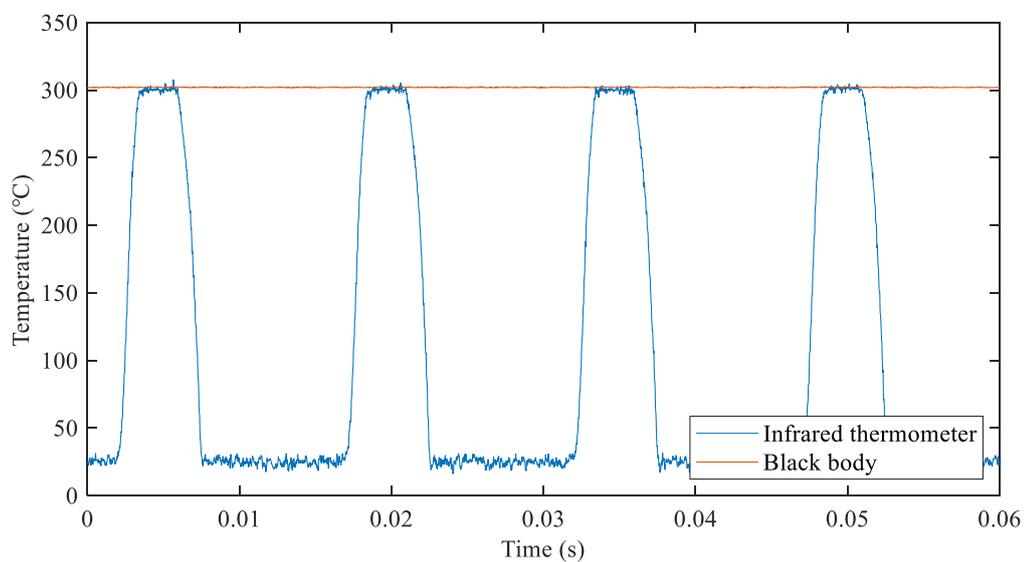
図 4.10 に 2 種類の砥石を用いて、主軸回転速度を変化させたときの出力結果を示す。時間軸は異なることに注意されたい。主軸回転速度 1000 r/min においては、どちらの砥石も応答時間 100 μ s に対して、開口時間に余裕があるため、波形の頂部では黒体炉の温度ほぼ 300 $^{\circ}$ C が計測されている。4500 r/min では、Type A の場合、開口時間は 91.5 μ s と応答時間 100 μ s を少し下回っているため、黒体炉の温度よりも 2 $^{\circ}$ C 程度低い結果となった。しかしこれは誤差として許容できるものと考えられる。一方、Type B の砥石は開口時間が 322.4 μ s となり、余裕があるため、波形の頂部ではほぼ 300 $^{\circ}$ C が計測されている。最後に 7000 r/min では、Type A の場合、開口時間が応答時間より短いため、300 $^{\circ}$ C をわずかに下回っているが、5 $^{\circ}$ C 程度であり、これも誤差として許容できるものと考えられる。一方 Type B の場合では、

開口時間に余裕があり、ほぼ 300°C が計測できている。

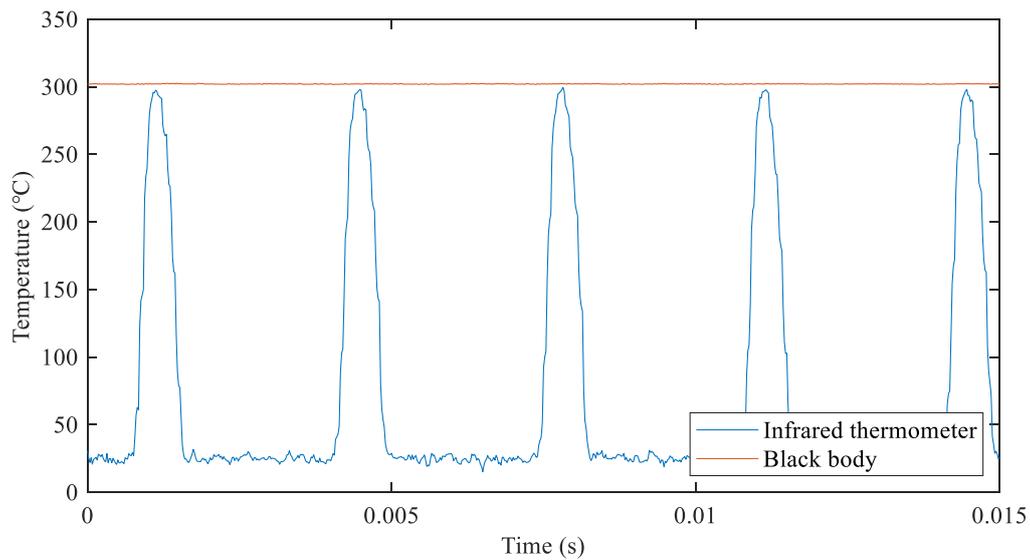
頂部がフラットな波形は計測精度の余裕を意味しており、任意に指定した累積継続時間（ピークホールド回数）をカウントする簡単なロジックで判定し、余裕判定であれば砥石回転数を上げる、危険の判定であれば下げる又は停止する等のリアルタイム自動化が可能となる。



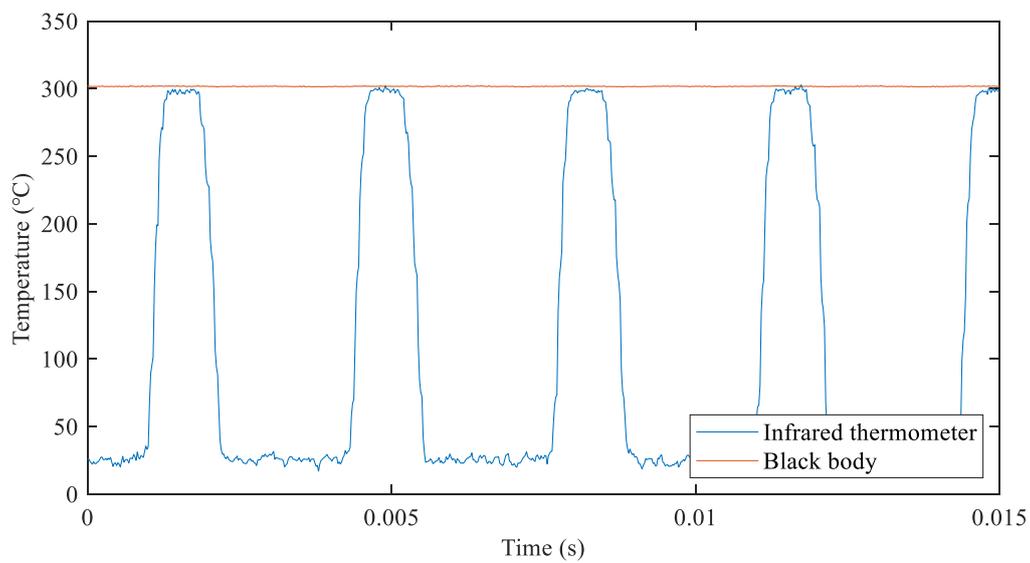
(a) 1000 r/min (Type A)



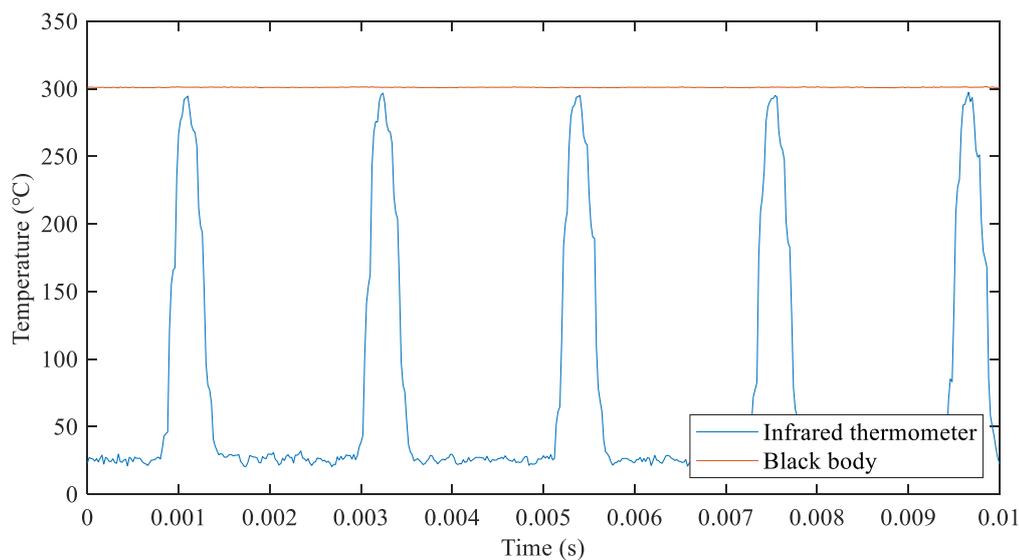
(b) 1000 r/min (Type B)



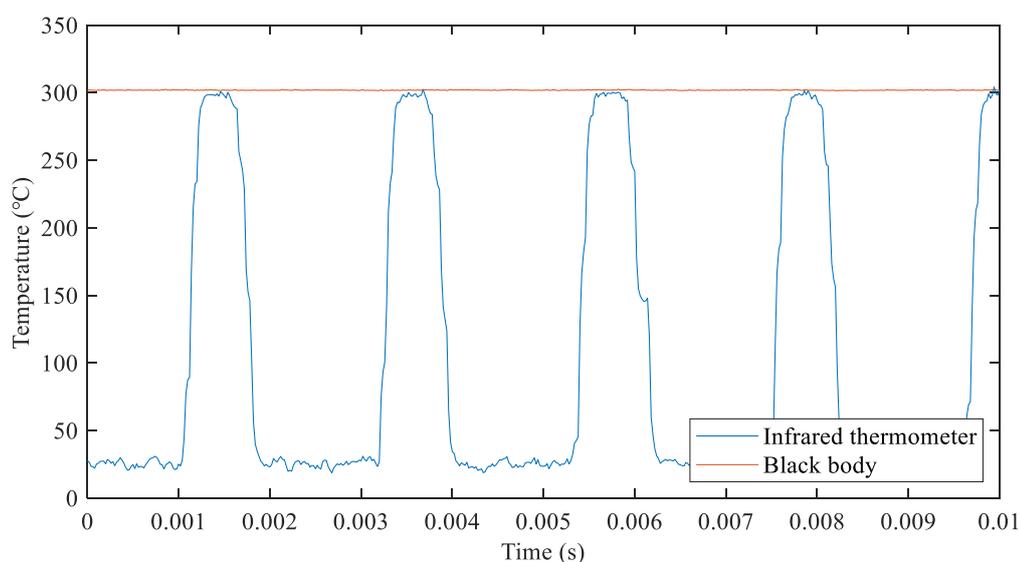
(b) 4500 r/min (Type A)



(c) 4500 r/min (Type B)



(d) 7000 r/min (Type A)



(f) 7000 r/min (Type B)

Fig. 4.10 Temperature measurement result on blackbody furnace with different configuration grinding wheel.

4.4 まとめ

本章では、はじめに赤外線放射温度計を用いた新しい研削面の温度測定手法の測定原理について述べた。そして、黒体炉を用いて主軸回転速度に対する測定温度波形の応答性について調査した。その結果、以下のことが明らかになった。

(1) 測定対象、工具軸の垂直線上に小穴を設けた中空の砥石、赤外線放射温度計の順に配置することで、砥石の2つの小穴を通して加工面の温度を計測することが可能となる。提

案手法は、熱電対を用いた手法やサーモカメラを用いた従来の手法に比べて、加工中、研削面の温度をインプロセスで測定が可能な原理の確認ができた。

(2) 300 °Cに均熱した黒体炉をターゲットとして提案手法を適用したところ、7000r/minの高速回転においても、Type Aの砥石では5°C程度の誤差で温度計測が可能であった。またType Bの砥石では小穴径が大きいことから、応答時間に余裕があり、7000 r/minにおいてもほとんど温度が低下することなく温度計測することが可能であった。

第5章

赤外線放射温度計を用いた研削面の温度測定手法による CFRP の研削加工時の異常の検知への適用

5.1 はじめに

第4章では、提案する赤外線放射温度計を用いた温度計測手法の測定原理について述べ、温度測定動作特性の検証を行った結果、高速回転した砥石の2つの小穴から測定対象の温度を計測可能であることが分かった。本章では、赤外線放射温度計を用いた温度計測手法をCFRPのドライ研削加工に適用し、加工中の研削面温度の測定を行い、実加工にも適用可能であることを検証する。その後、赤外線放射温度計の測温部の位置と測定温度との関係性を、数値解析によって求めた研削面の温度分布から明らかにする。また従来の温度計測手法である熱電対を用いた温度計測手法と比較することで、温度測定結果の妥当性を検証する。そして加工の異常の発生の検知に赤外線放射温度計を用いた温度計測手法が有効であることを調査し、最後に一般砥石であるビトリファイド砥石にも本手法が適用可能であることを検証する。

5.2 CFRP と試験片の概要

研削加工は金属材料だけでなく CFRP にも有効であることが分かっている。CFRP の加工では、水分の含侵を避けるためドライ加工が指定される場合も多い。またエポキシ樹脂のガラス転移温度よりも高温となると CFRP の機械的特性が劣化するため、加工時の温度に留意する必要がある。そこで本研究では赤外線放射温度計を用いた温度計測手法を CFRP のドライ研削加工に適用し、加工中の研削面温度の測定を試みる。

使用した CFRP の機械的性質を表 5.1 に示す。一方向プリプレグ（東邦テナックス社製 QUI135-197A）を積層し、板厚 7.8 mm に硬化した CFRP プレートを使用した。積層構成は 0°, -45°, 45°, 90°とした擬似等方材である。図 5.1 に繊維配向方向の配置を示す。下層から 0°, -45°, 45°, 90°を一組として 5 組を積層した後、今度は逆に 90°, 45°, -45°, 0°の組み合わせで 5 組が積層されている。図 5.2 に使用した試験片を示す。赤外線放射温度計の視野欠けによる温度低下を防止するため、厚さ 7.8 mm の CFRP のプレートを 2 枚重ねて接着することで、赤外線放射温度計の測温部の直径(8 mm)よりも試験片の厚みが十分に大きくなるようにした。

Table 5.1 Mechanical property of CFRP

Carbon fiber	TOHO TENAX QU 135-197A	
Resin	Epoxy resin #135	
Fabric weight	g/m ²	190
Curing temperature	°C	180
Thickness of prepreg	mm	0.187
Number of layers		40

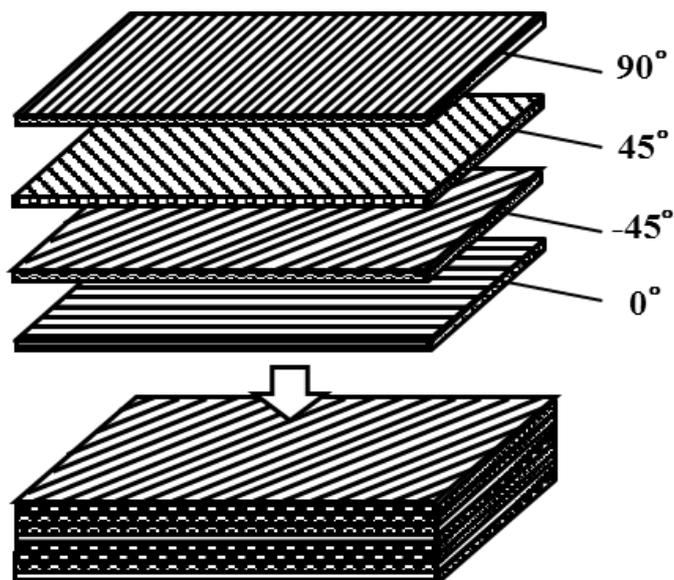


Fig. 5.1 Surface of CFRP



Fig. 5.2 Workpiece of CFRP

5.3 砥石内冷風供給の温度測定への影響

5.3.1 砥石内冷風供給

赤外線放射温度計を用いた温度計測手法を CFRP のドライ研削加工に適用する場合、切りくずが飛散し、一部が測定の光路にかかると赤外線の伝播を妨げ、誤差が生じる恐れがある。そこで砥石の内側から冷風供給することにより、砥石内部への切りくず侵入の阻止を試みる。図 5.3 にその砥石内冷風供給の概略図を示す。中空の砥石の下面にカバープレートを設置し、その中心から冷風を供給することにより、砥石内部への切りくず侵入を回避すると同時に、加工面への冷却効果が期待できる。冷風装置(TOHIN エアクーラー AC-80)を図 5.4 に示す。コンプレッサーより供給される圧縮空気を図 5.5 に示すドライフィルター(前田シェルサービス M-110-5)で水滴、油滴を除去し、クリーンなドライエアに変え、冷風装置に供給する。流量は配管内に流量計(SMC デジタルフロースイッチ PFMB7202)を設置して調節した。

工作機械のセンタースルーがエアー供給になれば、この方法は不要なので安価で簡便にした。

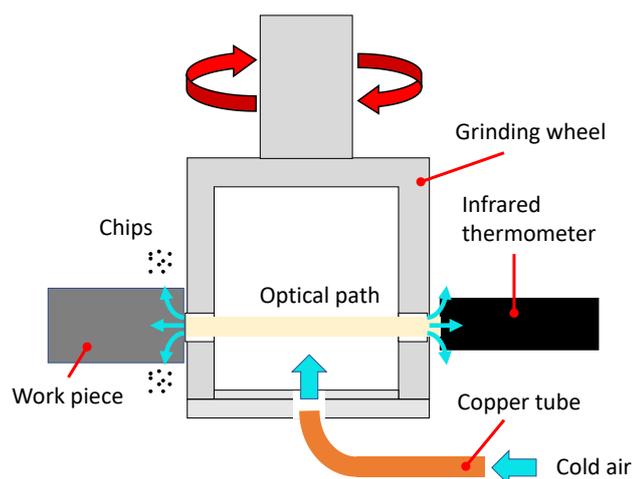


Fig. 5.3 Cold air supply and avoiding the effect of chips.



Fig. 5.4 Cold air generator



Fig. 5.5 Dry filter

5.3.2 実験手法

砥石内冷風供給が切りくずの光路侵入を抑制する効果を調べるため、ハイスピードカメラを用いて研削加工中の加工面の撮影を回転する砥石の2つの小穴越しで行った。図5.6に加工中の研削面の撮影実験のセットアップ、表5.2に実験条件を示す。冷風の供給の有無での加工面を比較することで、砥石内冷風供給が切りくずの挙動に及ぼす影響の調査を行った。なお砥石は $\phi 18$ の小穴と長径が18 mmの長い丸穴がそれぞれ2つつけられているType Bを使用した。

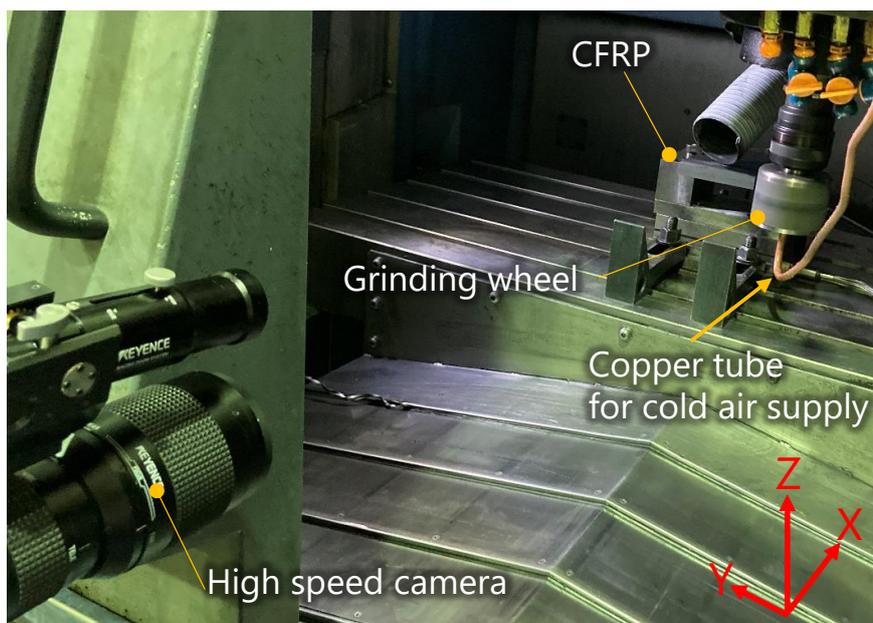


Fig. 5.6 Experimental set-up

Table. 5.2 Experimental condition

Rotation speed	r/min	2000
Grinding speed	m/s	8.8
Feed rate	mm/min	1000
Depth of cut	mm	0.3
Grinding direction		Down cut
Grinding condition		No cold air, Internal cold air
Air volume	L/min	464
Frame rate	fps	4000

5.3.3 実験結果

図 5.7 に加工面の撮影結果を示す。冷風を供給しない場合では、小穴における赤い点線で囲った部分は黒い靄のようなものがかかり、CFRP の加工面がはっきりと見えない。これは発生した CFRP の黒い切りくずが光路を遮っているためであると考えられる。一方、砥石内冷風供給を適用した場合は、それに比べて加工面がはっきりと確認できる。これは冷風を供給することによって、光路を遮る切りくずを減少させることができたためであると考えられる。したがって、砥石内冷風供給を適用することで、加工中、切りくずが研削面の温度測定を阻害する影響を低減できることが分かった。

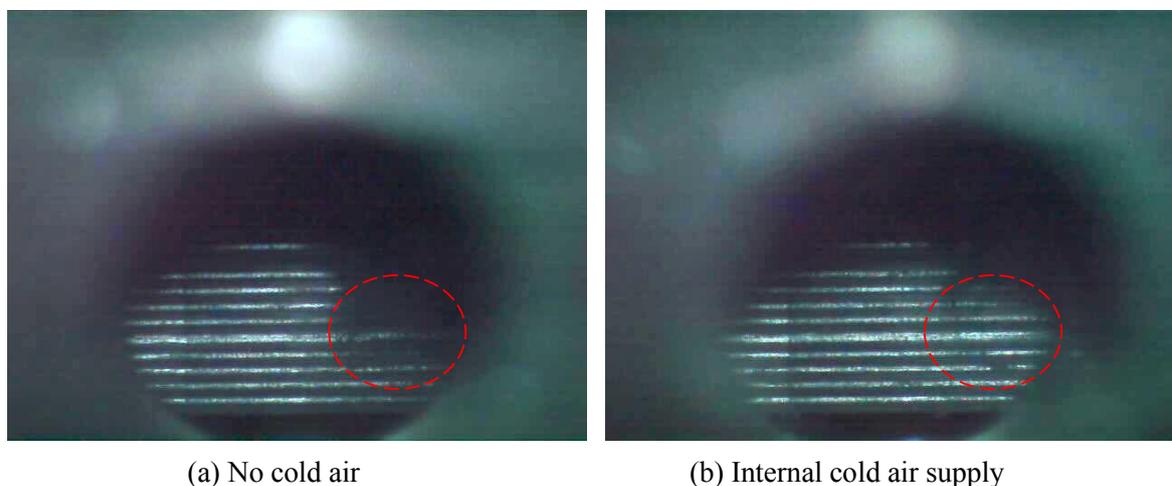


Fig. 5.7 Observation of grinding surface

5.4 CFRP の端面研削加工時の研削面の温度測定

5.4.1 実験方法

図 5.8 に端面研削加工時の研削面の温度測定実験のセットアップを、表 5.3 に加工条件を示す。送り速度と砥石周速度は一定にし、精密削り、粗削り、高能率研削加工をそれぞれ想定した切込み深さ 0.02, 0.2, 1.0 mm において、CFRP の端面研削加工を行った際の研削面温度の測定を行った。砥石は $\phi 18$ の小穴と長径が 18 mm の長い丸穴がそれぞれ 2 つずつ設けら

れている Type B を使用し、赤外線放射温度計の光路が工具軸に垂直かつ、測温部が試験片側の砥石の小穴の中心付近に位置するように赤外線放射温度計を設置した。なお CFRP の放射率は校正試験により 0.952 に設定した。

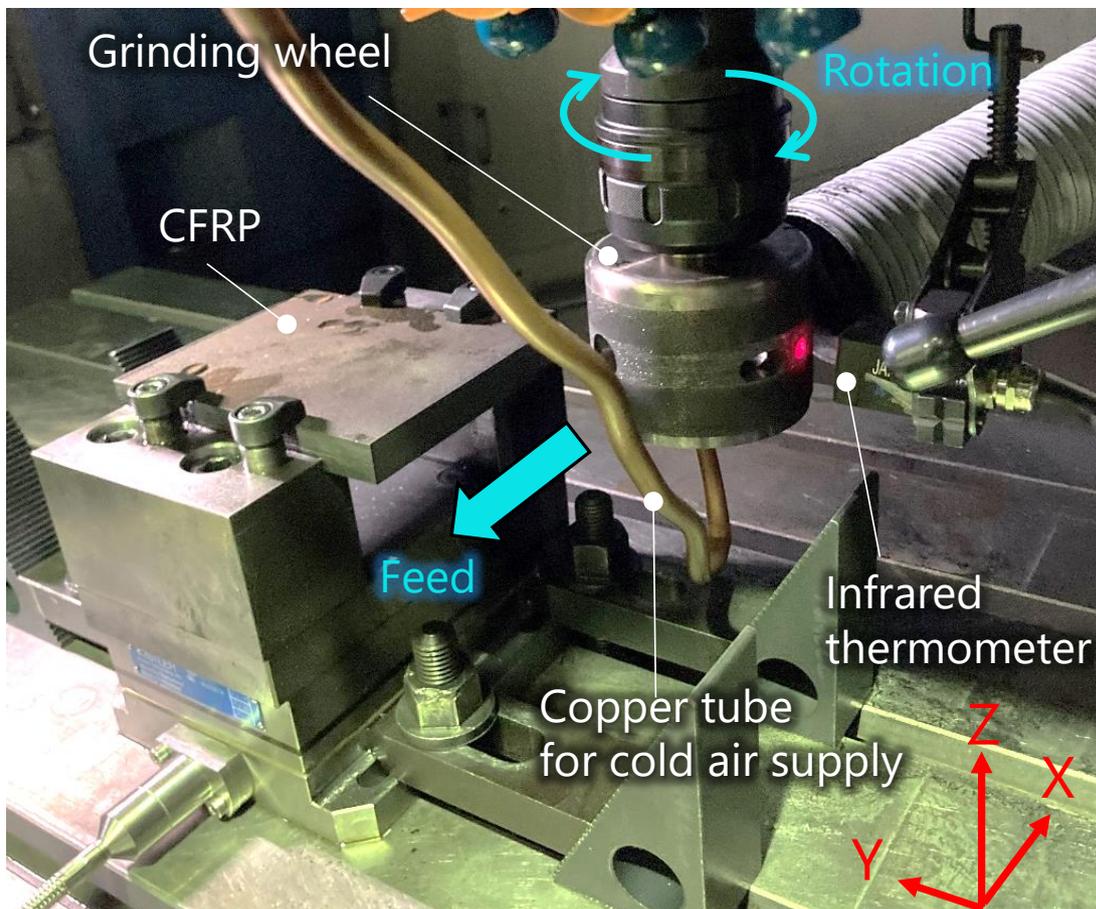


Fig. 5.8 Experimental setup

Table 5.3 Experimental conditions

Grinding wheel		Type B
Optical holes on type B		Φ18 mm×2 and oval holes with a major axis of 18 mm
Rotation speed	r/min	4500
Grinding speed	m/s	19.8
Feed rate	mm/min	1000
Depth of cut	mm	0.02, 0.2, 1.0
Grinding direction		Down cut
Grinding condition		Internal cold air supply
Emissivity of CFRP		0.952
Temperature measurement area position		Center
Air volume	L/min	464
Air temperature	°C	13
Sampling rate	kHz	50

校正試験は、図 5.9 に示すセンサー（赤外線放射温度計）と、砥石表面で実施した。

センサーは、①保証された黒体炉の温度とセンサーが計測した温度が一致したか確認した、②CFRP をヒートガン（工業用ドライヤー）で加熱し同時に物温計と熱電対の計測値とセンサーの計測値が一致するまで放射率を▼▲ボタンで合わせ確認し校正とした、③CFRP を砥石で研削し計測値を確認する実証方法を採用した。

CFRP の更なる校正手段として、約 100℃に加熱した鉄板に CFRP を置き、①黒体スプレーを一部に塗布しスプレーが保証する放射率に合わせ、②スプレーしていない部分を計測し①の温度になるまで放射率を▼▲ボタンで一致させ 10 秒間の温度差が 0.1℃以内を CFRP の放射率とした。

砥石（CFRP の切り屑に覆われた表面）の放射率も黒体スプレー塗布面を基準にした同様な方法で放射率を設定し計測値の正確を期した。

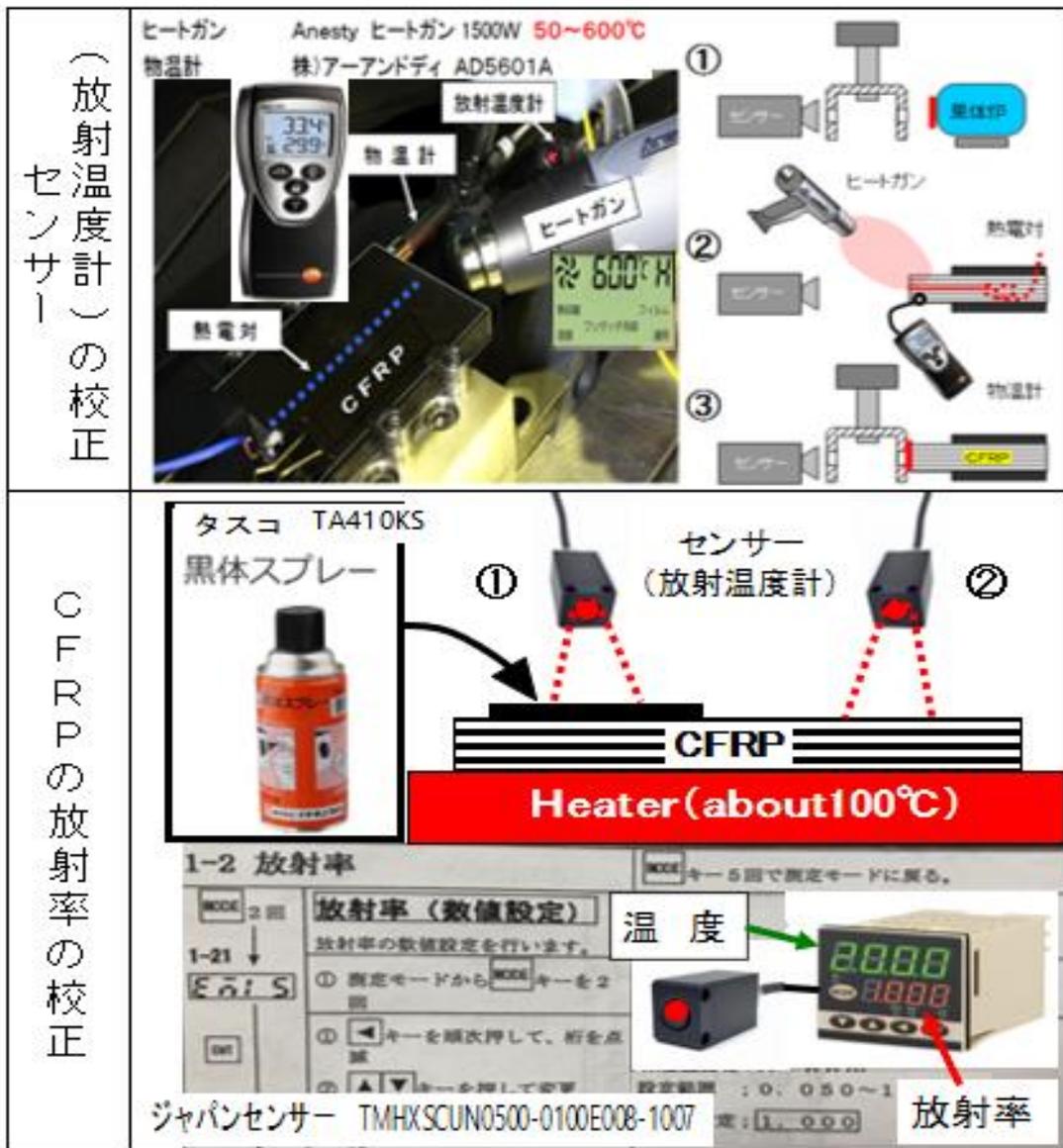
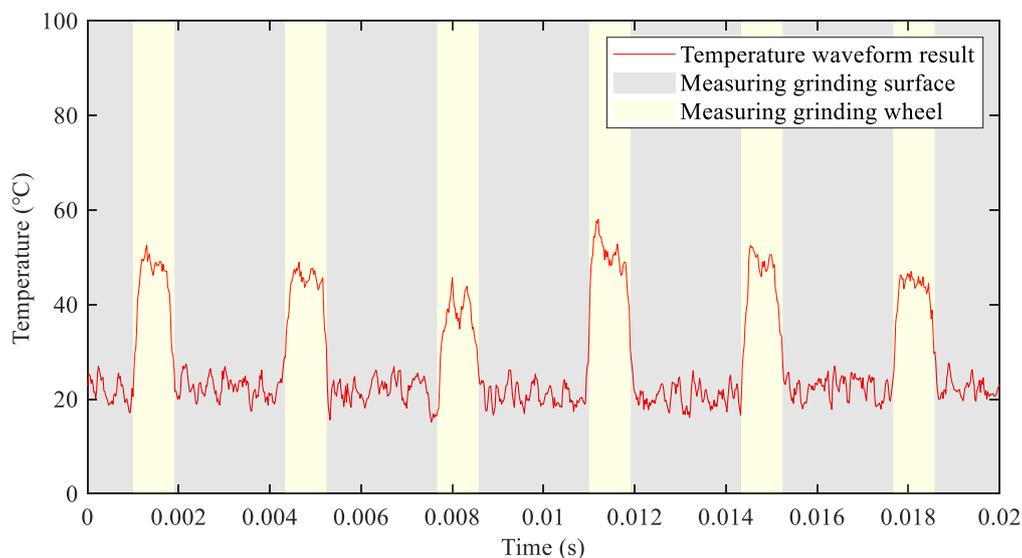


Fig. 5.9 Infrared thermometer and how to calibrate the emissivity of the grindstone surface

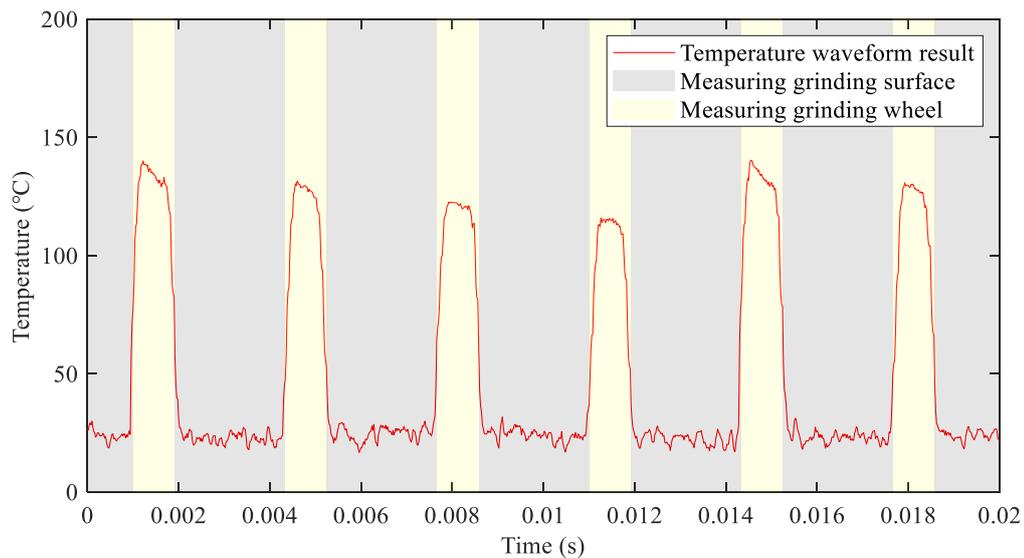
5.4.2 実験結果

図 5.10 に温度測定結果を示す。黄色で塗られた部分が赤外線放射温度計の測温部が加工面に位置するとき、灰色の部分で砥石表面に測温部が位置するときの温度波形を示している。いずれの切込み深さにおいても光路が開く度に、周期的に加工面の温度が計測されていることがわかる。一方、砥石表面に測温部が位置する場合も温度は出力されているが、CFRP の放射率で換算された出力値であるため、真の砥石表面の温度とは異なることは注意されたい。砥石表面の洗浄後、研削量 3146 mm³(切込み深さ 0.02 mm×19 path, 0.1 mm×18 path, 0.5 mm×5 path, 1.0 mm×20 path, 1.5 mm×5 path, 研削距離 100 mm)で多少の目づまりがあるとき、研削量 5722 mm³(切込み深さ 0.02 mm×6 path, 0.1 mm×16 path, 0.5 mm×5 path, 1.0 mm×40 path, 1.5 mm×1 path, 2.0 mm×4 path, 3.0 mm×1 path, 研削距離 100 mm)で CFRP の切りくずによって完全に目づまりした状態の放射率を図 5.11 に示す。CFRP の切りくずによって砥石表面が目づまりするにつれて、砥石表面の放射率は大きくなっていることから、加工中の砥石表面の放射率は 0.79~0.88 の間にあると予想される。したがって図 5.9(c)の切込み深さ 1.0 mm において、砥石表面温度の出力結果が 30 °C の場合、砥石表面の放射率で換算すると 33~37 °C となる。以上の結果より、赤外線放射温度計を用いた温度計測手法は CFRP のドライ研削加工時、精密削り、粗削り、高能率研削加工を想定したいずれの切込み深さにおいても、研削面と砥石表面の温度を、インプロセスで測定することが可能であることが分かった。

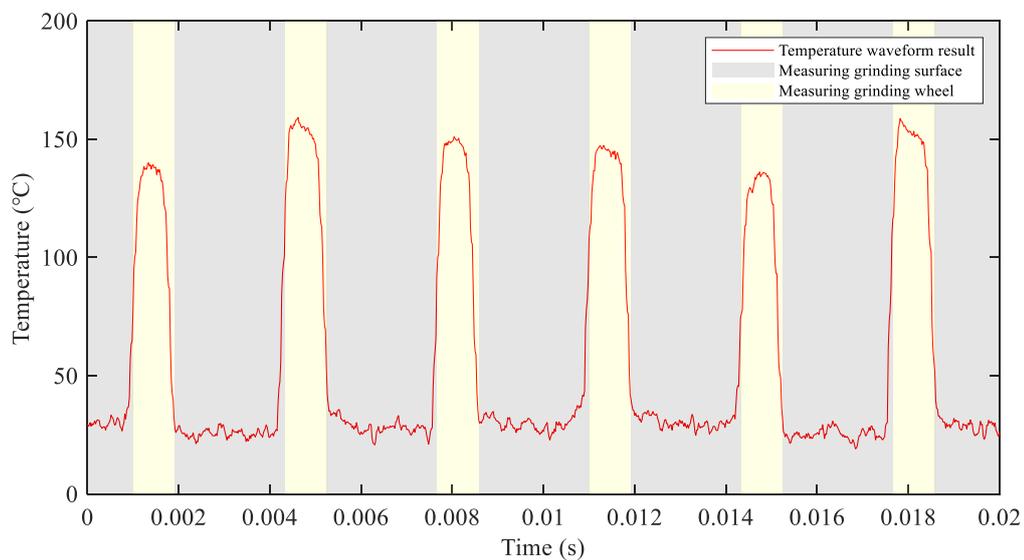
これは、刻々と変化する砥石表面の(目づまり)入力画像を、予めデジコンテーブルの放射率基準になるマスター画像データとしてコンピューターが持つことで、温度を補正する自動判定のマッチングアルゴリズムの可能性を示している。



(a) t=0.02 mm



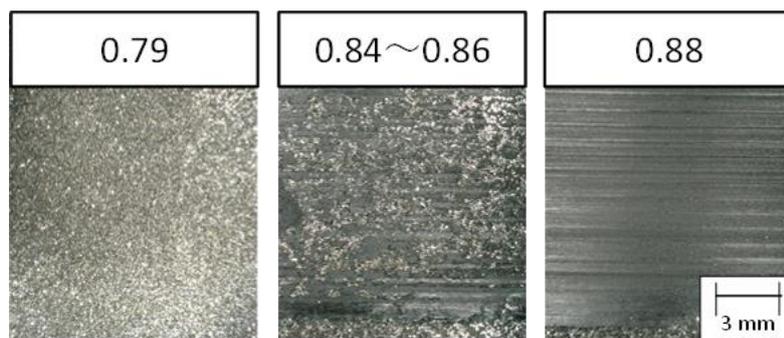
(b) $t=0.2$ mm



(c) $t=1.0$ mm

Fig. 5.10 Temperature measurement result

※When measuring the temperature of the grinding surface, 30 °C is 33 to 37 °C when converted to the emissivity of the grinding surface



(a) Before grinding (b) Partially clogged (c) clogging

Fig. 5.11 Transition of emissivity of grinding surface

5.5 赤外線放射温度計の測温部の位置と測定温度の関係

5.5.1 実験方法

研削点前後の研削面には温度分布があるため、赤外線放射温度計の測温部位置によって測定される温度は変化することが予測される。そこで測温部の位置が測定温度に及ぼす影響の調査を行った。なお測温部の位置は図 5.12 に示すように仕上げ面側、中央、接触弧側の 3 つのパターンに変化させた。赤外線放射温度計の測温部の位置の設定に使用した、位置合わせ用の穴付きキャップを図 5.13 に示す。工作物側の砥石の小穴に、穴付きキャップを取り付け、工作物側の小穴の中心軸と加工面が垂直となるように砥石の回転位置を設定し、図 5.11 のように光路が $\phi 9$ の位置合わせ用の穴に収まるように赤外線放射温度計を設置した。

表 5.4 に実験条件を示す。以後、赤外線放射温度計を用いた温度計測手法の温度結果の指標として、加工中、砥石 1/4 回転毎に計測される温度波形の各山の頂部の平均値である「平均ピーク温度」を使用する。切込み深さ、測温部の位置をそれぞれ 3 パターンで変化させ、計 9 条件で平均ピーク温度の比較を行った。

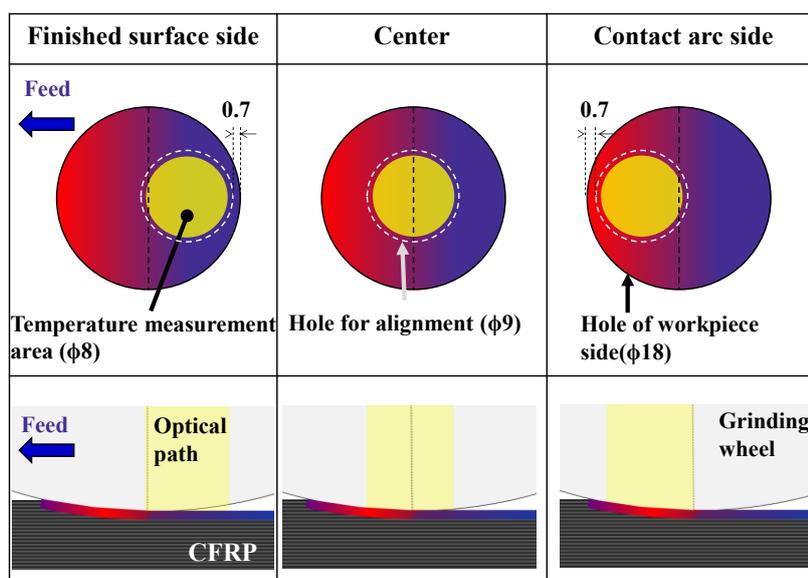


Fig. 5.12 Position of the temperature measurement area of infrared thermometer



Fig. 5.13 Cap with holes for alignment

Table 5.4 Grinding conditions

Grinding wheel	mm	Type B
Rotation speed	r/min	4500
Grinding speed	m/s	19.8
Feed rate	mm/min	1000
Depth of cut	mm	0.02, 0.2, 1.0
Grinding direction		Down cut
Emissivity of CFRP		0.952
Temperature measurement area position		Finished surface side, Center, Contact arc side
Air volume	L/min	464
Air temperature	°C	13
Sampling rate	kHz	50

5.5.2 実験結果

図 5.14 に温度測定結果を示す。切込み深さが 0.02 mm の場合、測温部の位置が接触弧側の場合が最も低く、切込み深さが 0.2 mm の場合は、中央が最も高く、切込み深さが 1.0 mm の場合は、接触弧側、中央、仕上げ面側の順に高い結果となり、切込み深さによって各測温部の位置における平均ピーク温度の大小関係が変化する結果となった。

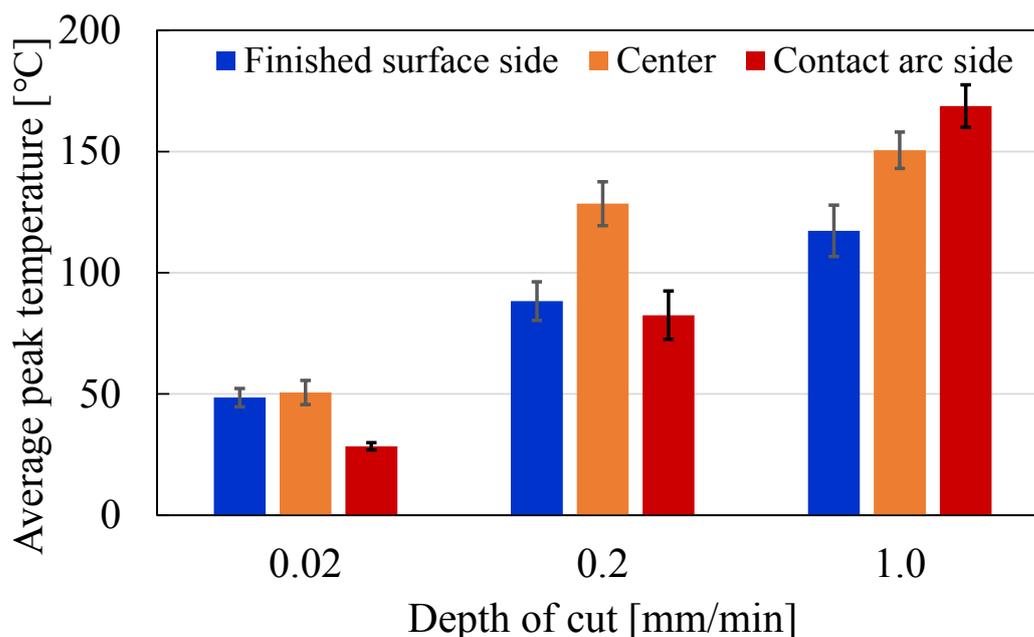


Fig. 5.14 Relationship between position of measurement area of infrared thermometer and temperature

5.5.3 研削面表層温度の数値解析

切込み深さによって各測温部の位置における測定温度の大小関係が変化する原因を調査するため、各測温部の位置における研削面の温度分布を数値解析によって求め、測温部の位置と測定温度の関係性の定量的な評価を行った。解析モデルを図 5.15 に示す。砥石と加工物の接触面全体を一様な強度を持った、接触弧長さに対して非常に大きい幅を持った帯状の熱源と仮定し、その熱源が速さ v で半無限体の表面上を移動した場合の加工物表面の温度分布を求めた。実際には接触面の形状は砥石外周に沿った曲面となるが、切込み深さは砥石直径に比べて十分に小さいため、研削幅 B と接触弧長さ l からなる長方形とみなしている。先行研究においてイエーガーの移動熱源の考え方をもとに高沢らが改良した研削面表層温度の理論式⁽⁵³⁾を式(5.1)に、解析のパラメータを表 5.5 に示す。材料は等方性材料とし、砥石と工作物の接触領域以外での熱伝導はないものとしている。実験環境の温度と水平方向の研削抵抗は解析と同じ条件で加工実験した際の実測値を用いた。CFRP の比熱と熱伝導率は、炭素繊維の配向方向や量、種類によって変わる。使用した試験片の比熱と熱伝導率の正確な値は実験で求めていないため、先行研究で求められた CFRP の比熱 $0.68 \text{ J/Kg} \cdot \text{K}$ 、熱伝導率 $3.17 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ を使用した⁽⁵⁴⁾。また先行研究において、WA 砥石で S45C を切込み深さ 0.02 mm で乾式研削加工した際の工作物への熱流入割合が約 70% であったことと、工作物への熱流入割合は周速度と送り速度の影響は小さく、切込み深さが大きくなるほど、小さくなる傾向がある⁽⁵⁵⁾ことから、熱流入割合を切込み深さが 0.02 mm では 70% 、切込み深さが 0.2 mm では 60% 、切込み深さが 1.0 mm では 50% と設定した。

$$\theta_{(z,x)} = \frac{2}{\pi} a \left(\frac{TV}{2JlB} \right) \cdot \frac{K}{k} \cdot \frac{1}{v} \int_{X-L}^{X+L} e^{-u} K_0(u^2 + Z^2)^{1/2} du \quad (5.1)$$

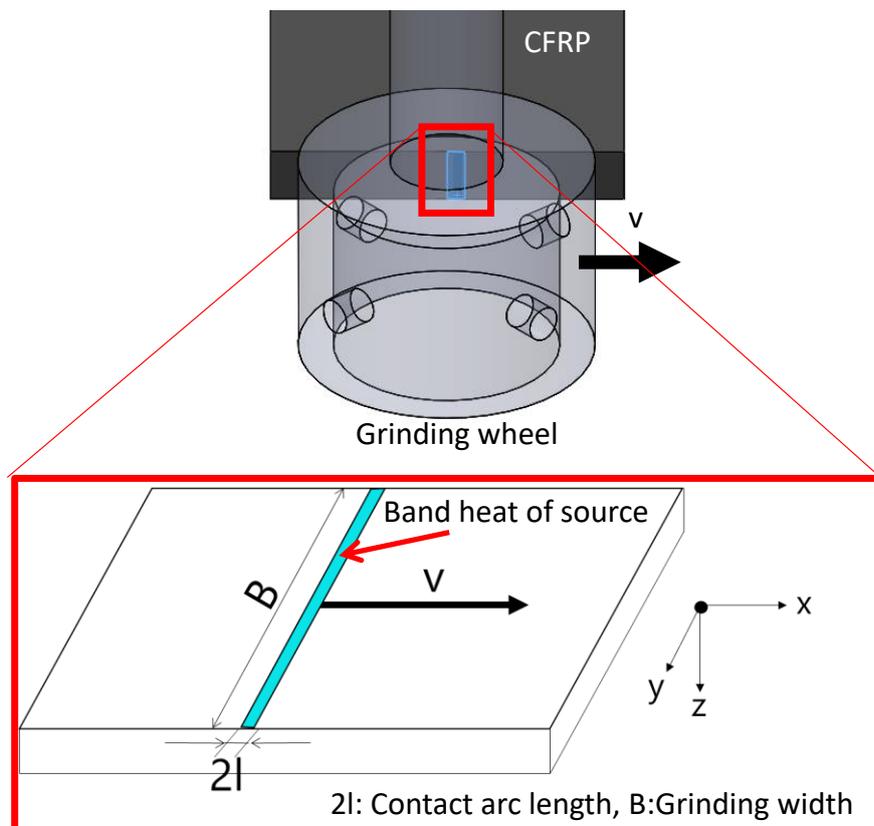


Fig. 5.15 Heat source moving model for temperature analysis

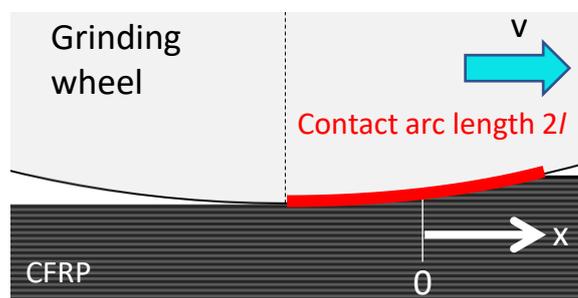
Table 5.5 Analysis parameter

Environment temperature	°C	20
Grinding wheel diameter	mm	84
Depth of cut	mm	0.02, 0.2, 1.0
Flowing rate into workpiece α	%	70, 60, 50
Horizontal grinding force T	N	12.1, 35.0, 73.9
Grinding speed V	m/s	19.8
Equivalent of heat work J	J/cal	4.1855
Contact arc length $2l$	mm	1.30, 4.10, 9.17
Grinding width B	mm	15.6
Thermal diffusivity of CFRP K	J/kg·K	0.68
Thermal conductivity of CFRP k	W/m·K	3.17
Feed rate v	mm/min	1000
Modified Bessel function of the second kind of order zero K_0		
$X=vx/2K$, $L = vl/2K$, $Z = vz/2K$		

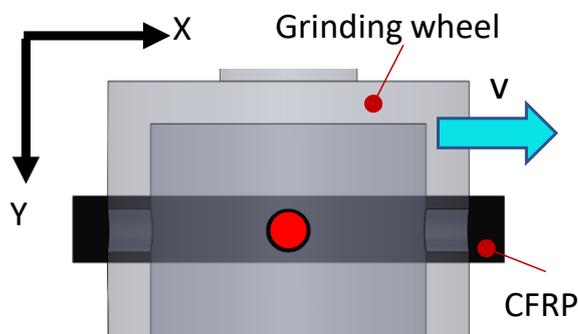
5.5.4 実験結果と数値解析結果の比較

図 5.16 に砥石が CFRP の端面研削加工している様子の概略図を示す。数値解析では送り方向を x 方向とし、接触弧の中心を原点としている。図 5.17, 5.20, 5.23 に各切込み深さにおける研削面の x 方向の温度分布を示す。黒の実線は、円弧の部分が接触弧を示し、その左側が仕上げ面を、右側が加工前の被削材表面を表しており、加工前の被削材表面から接触弧へと切り変わる点において、温度が立ちあがっていることが分かる。また、図 5.18, 5.21, 5.24 に、研削面表層の温度分布が y 座標によらず、 x 座標と z 座標のみによって定まると仮定した場合の、各測温部位置における x, y 方向の 2 次元の温度分布を示す。赤外線放射温度計は測温部内の平均値を出力する。ここでは数値計算で求めた研削面の 2 次元の温度分布から、各測温部の位置において、測温対象エリアを切り抜いた温度分布を示している。そして図 5.19, 5.22, 5.25 に、算出した温度分布より求めた、各測温部位置における平均温度と、実験結果の平均ピーク温度を比較した結果を示す。

切込み深さ 0.02 mm において、測温部位置が接触弧側の場合が最も温度が低くなる傾向は実験結果と数値解析結果で同様であった。解析結果において、測温部位置が接触弧側での平均温度は 30.5 °C となり、他の測温部位置に比べて 30 °C 以上低い結果となった。これは切込み深さ 0.02 mm では接触弧長さが 1.30 mm と、測温部径($\phi 8$)に対して微小であることで、測温部位置が接触弧側では、温度が室温(20 °C)である加工前の被削材表面が測温部の大半を占めるため、平均ピーク温度最も低い結果となった。



(a) Contact area between grinding wheel and CFRP



(b) View from infrared thermometer

Fig. 5.16 Schematic of grinding point on CFRP

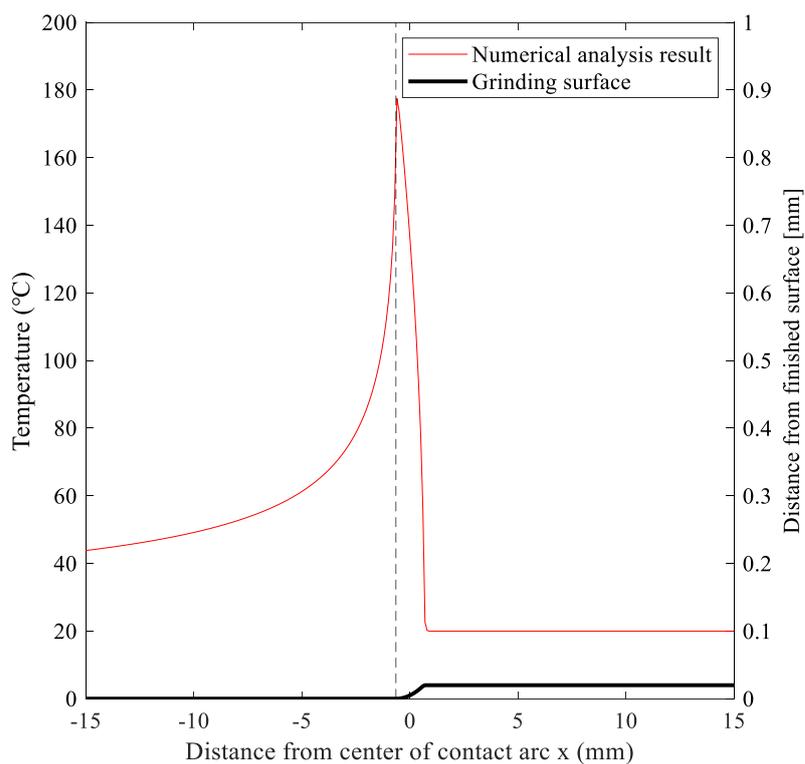
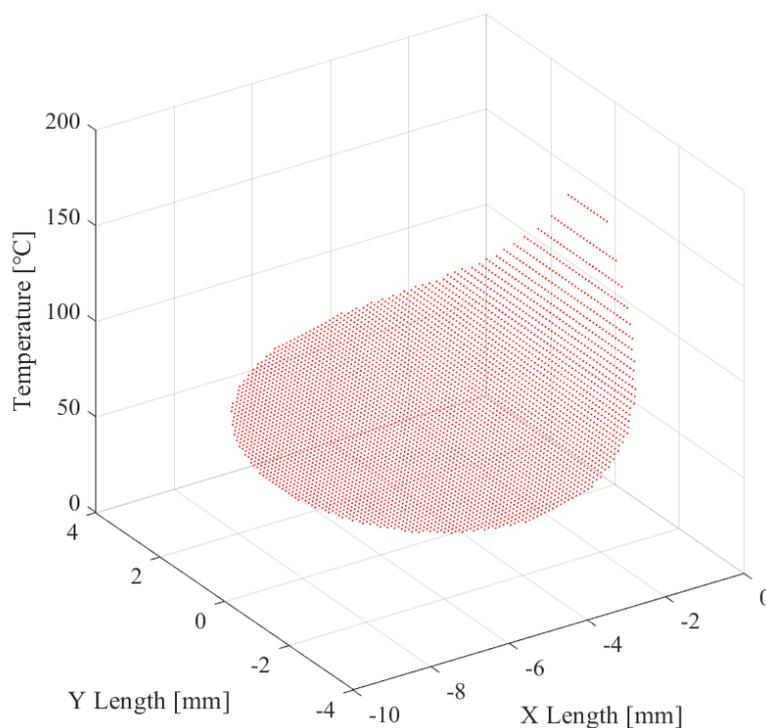
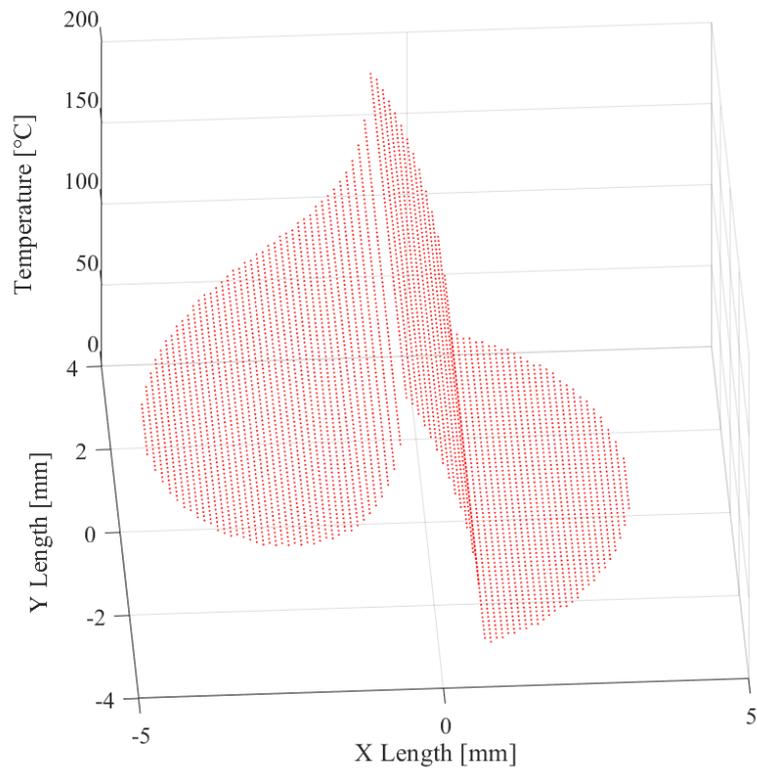


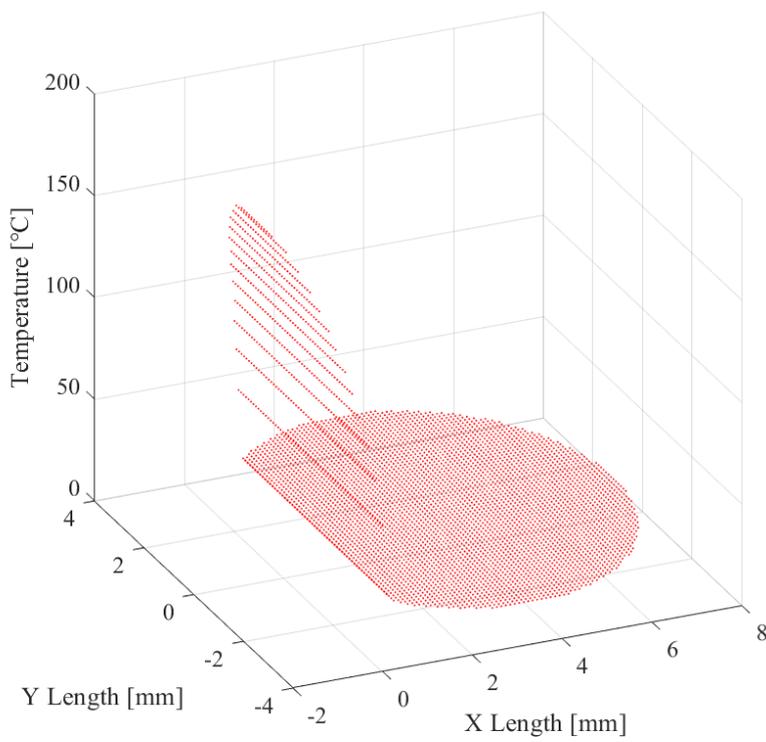
Fig. 5.17 Temperature distribution in the feed direction (t=0.02 mm)



(a) Temperature measurement position=Finished surface side



(b) Temperature measurement position=Center



(c) Temperature measurement position=Contact arc side

Fig. 5.18 Two-dimensional temperature distribution at each spot position ($t=0.02$ mm)

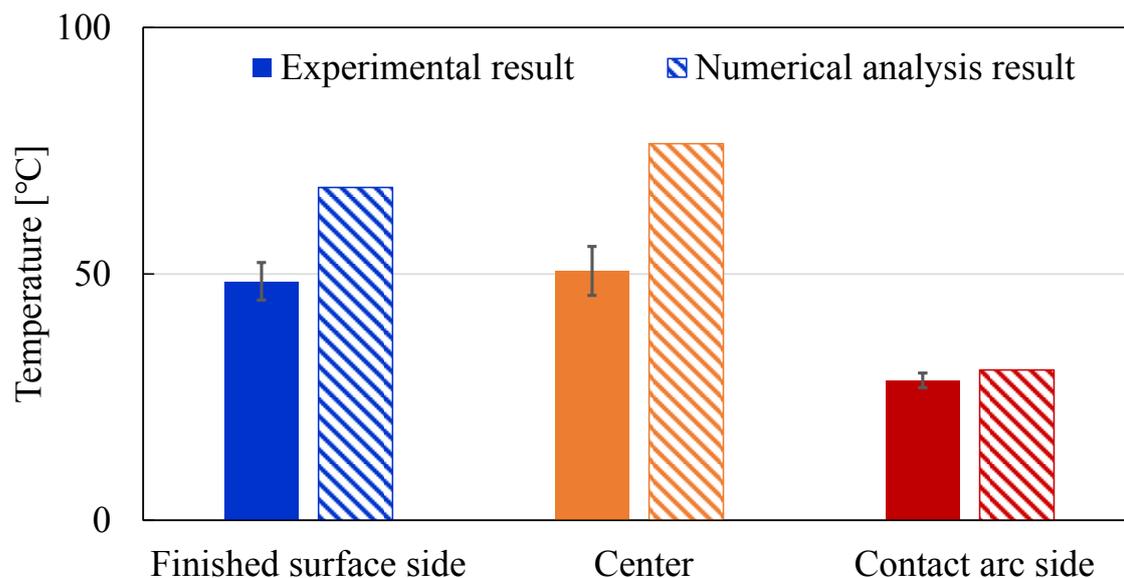


Fig. 5.19 Comparison of numerical analysis and experimental results ($t=0.02$ mm)

続いて切込み深さが 0.2 mm の場合, 測温部の位置が中央の場合が最も温度が高くなる傾向は実験結果と数値解析結果で同様であった. 解析結果において, 測温部位置が中央での平均温度は 171.9 °C となり, 他の測温部位置より 50 °C 以上高い結果となった. これは切込み深さが 0.2 mm では接触弧長さが 4.10 mm であり, 測温部は温度がピークとなる点を含み, 温度が室温である加工前の被削材表面を含まないためである. また, 測温部の位置が接触弧側の場合, 温度の低い加工前の被削材表面が測温部の半分近く占めるため, 平均ピーク温度は最も温度が低くなった.

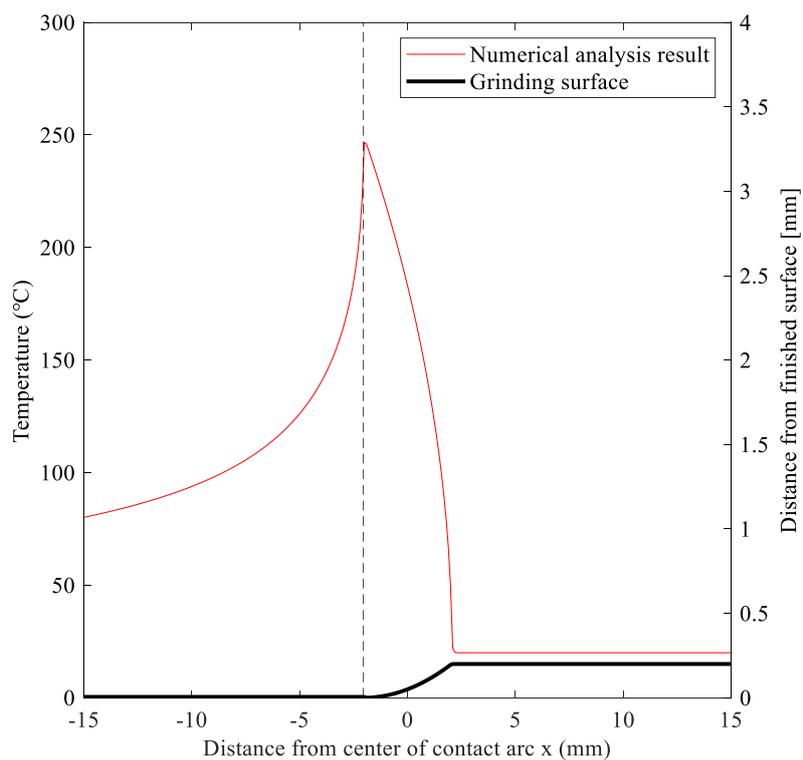
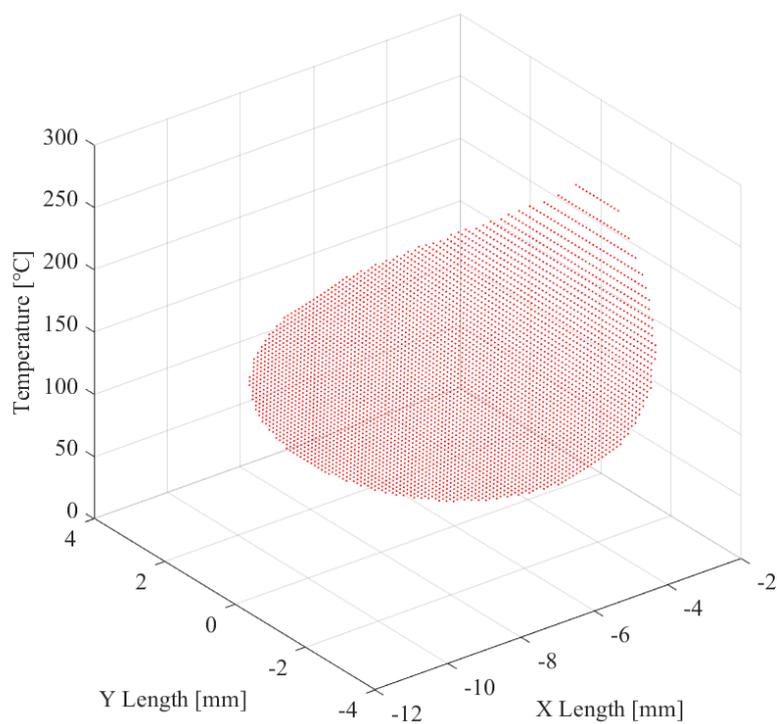
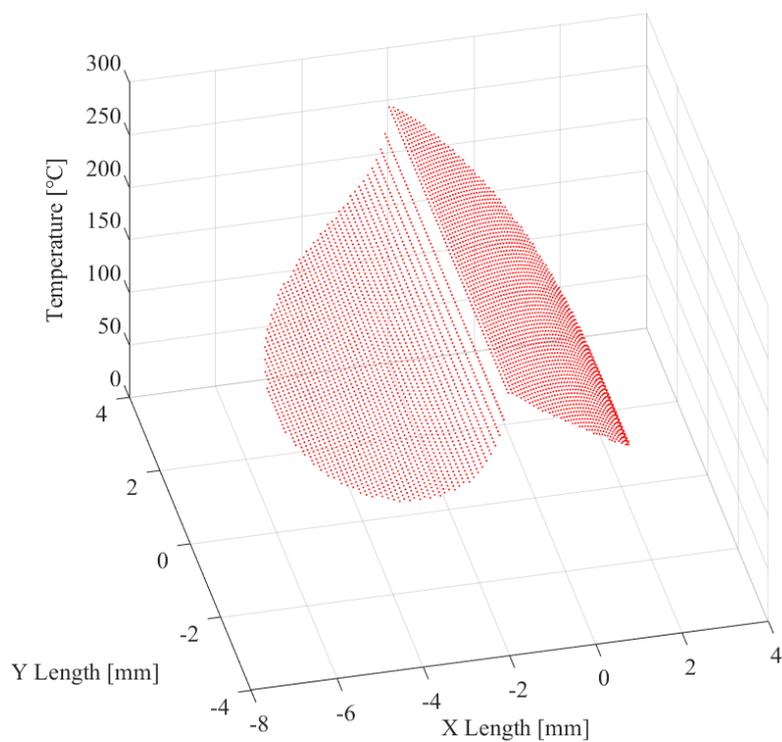


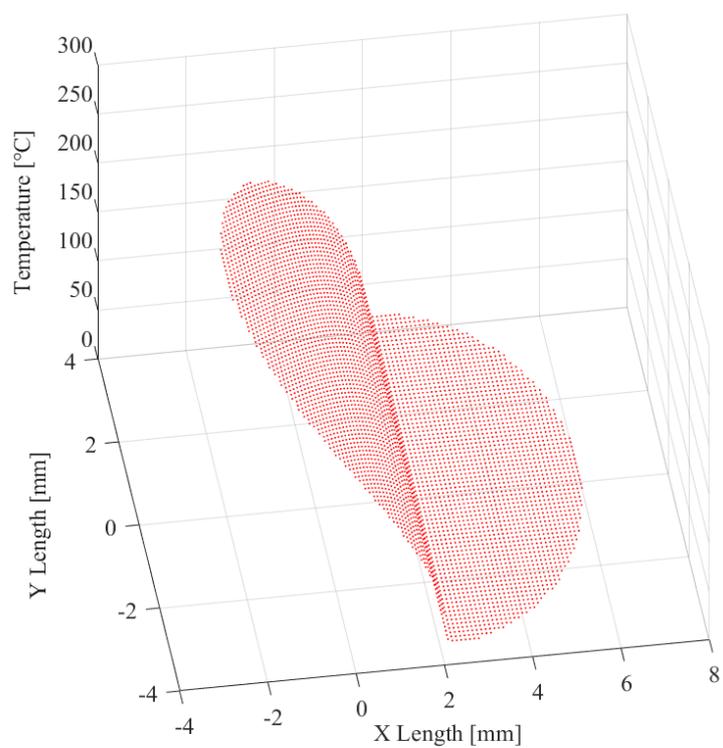
Fig. 5.20 Temperature distribution in the feed direction ($t=0.2$ mm)



(a) Temperature measurement position=Finished surface side



(b) Temperature measurement position=Center



(c) Temperature measurement position=Contact arc side

Fig. 5.21 Two-dimensional temperature distribution at each spot position (t=0.2 mm)

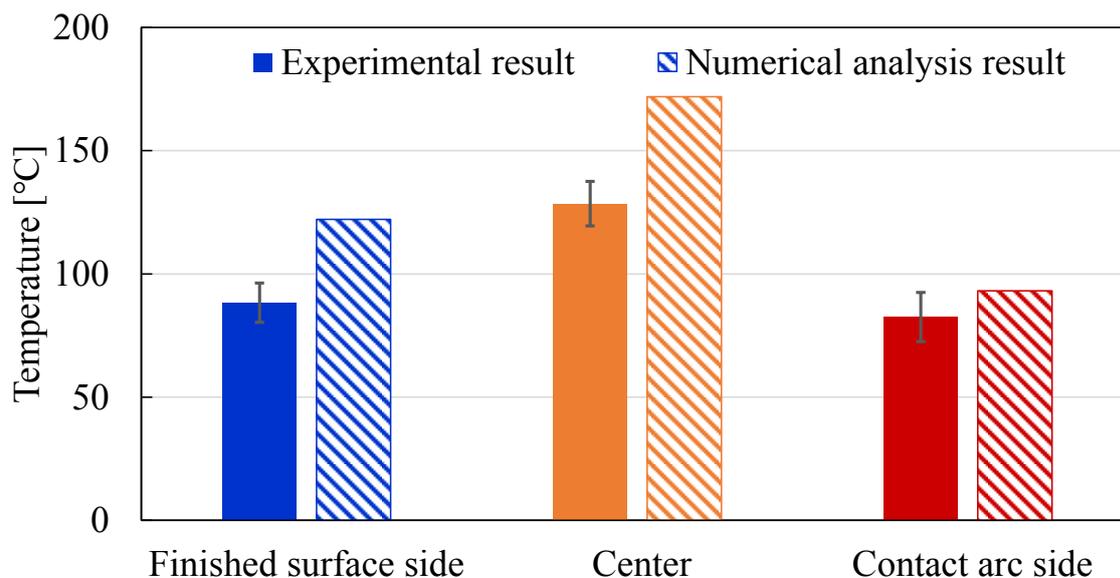


Fig. 5.22 Comparison of numerical analysis and experimental results ($t=0.2$ mm)

最後に切込み深さが 1.0 mm の場合、測温部の位置が仕上げ面側の場合が最も温度が低くなる傾向は実験結果と数値解析結果で一致した。一方、僅かではあるが、測温部の位置が中央と接触弧側の温度の大小関係は一致しなかった。異なる結果となった原因として、切込み深さが大きくなることによって、仮定した熱源モデルから遠のいたことが挙げられる。数値解析では接触弧長さに比べ研削幅が非常に大きい熱源モデルを仮定していたが、切込み深さが 1.0 mm では接触弧長さが 9.17 mm であり、研削幅 15.6 mm に近づいたことが原因として考えられる。

以上の通り、研削面において温度がピークとなる領域はごく一部であるので、 $\phi 8$ の範囲の平均温度を測定する赤外線放射温度計で、最高温度を測定するのは難しい。また、測温部の位置が接触弧側と中央の場合、切込み深さによって、接触弧と加工前の被削材表面の領域が測温部全体に占める割合が変化するため、評価対象が変化する。例えば、切込み深さを頻繁に変えるような加工の場合、測温部の位置が中央、接触弧側であると、切込み深さの変化と評価対象の変化の2つの要因によって温度が変化するため、公平な評価ができない。一方、仕上げ面側の場合は切込み深さによらず仕上げ面領域のみの温度を計測するため、評価対象は変わらず、切込み深さが変化しても公平な評価を行うことができる。

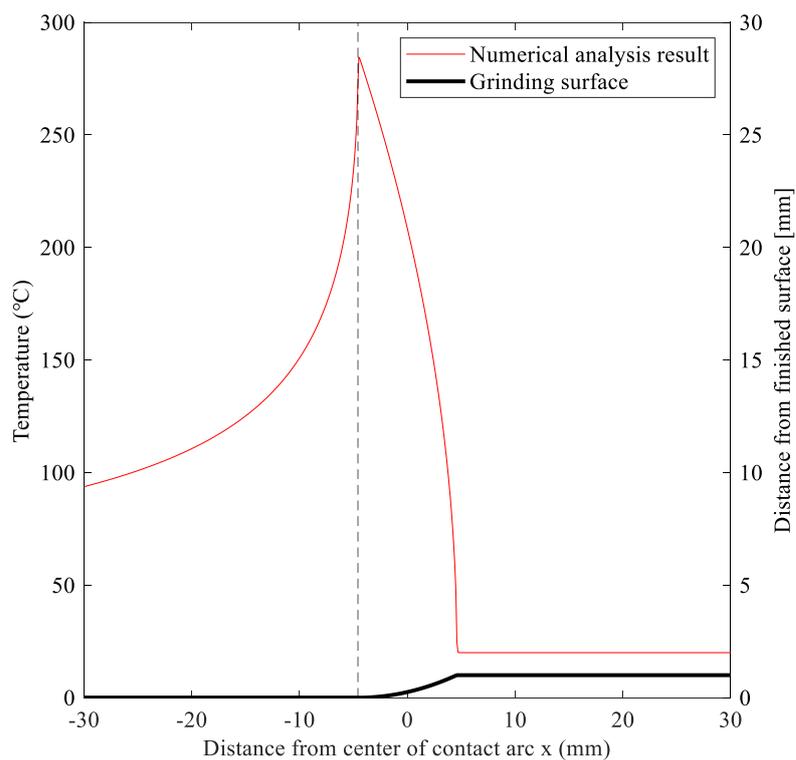
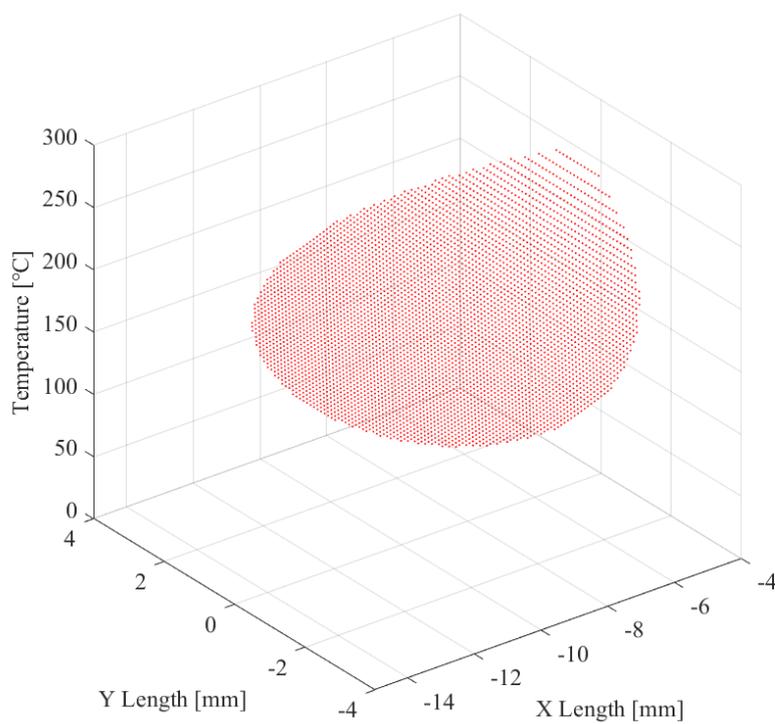
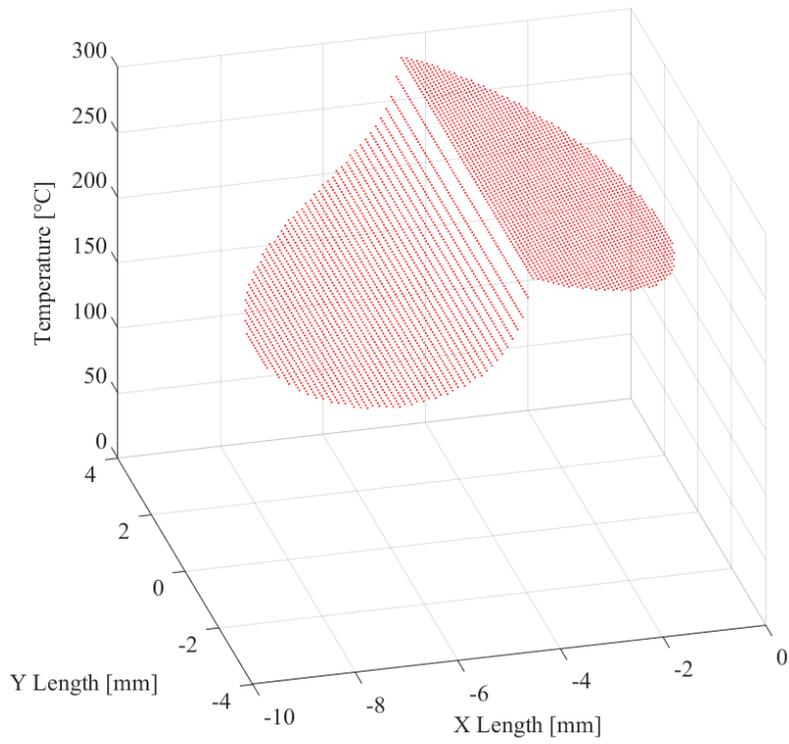


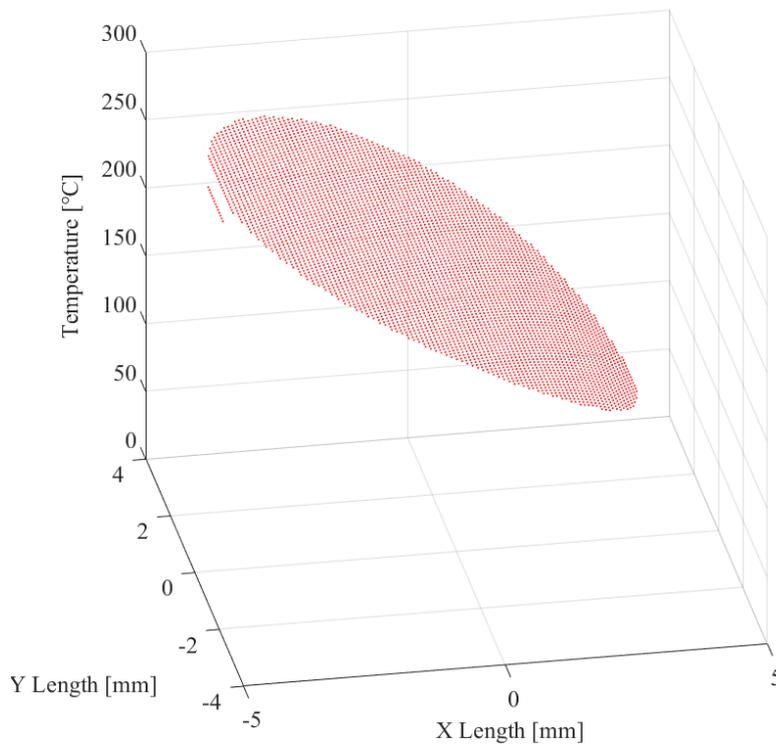
Fig. 5.23 Temperature distribution in the feed direction ($t=1.0$ mm)



(a) Temperature measurement position=Finished surface side

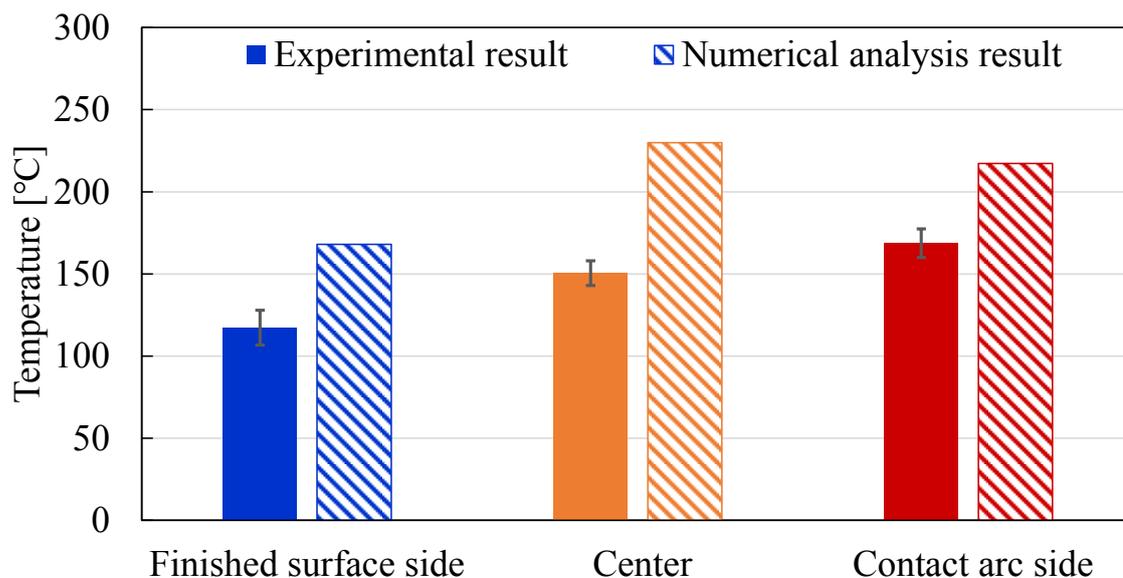


(b) Temperature measurement position=Center



(c) Temperature measurement position=Contact arc side

Fig. 5.24 Two-dimensional temperature distribution at each temperature measurement position (t=1.0 mm)

Fig. 5.25 Comparison of numerical analysis and experimental results ($t=1.0$ mm)

5.6 熱電対を用いた温度計測手法との比較

5.6.1 熱電対の温度測定環境

熱電対による温度測定方法には、冷接点補償を用いる方法と基準接点補償を用いる方法の2種類がある。冷接点補償では、測定中の冷接点温度を氷水等により 0°C に保つ必要がある一方、基準接点補償では、計測器側接点の温度を測定する必要がある。本研究では、冷接点を設ける必要のない基準接点補償を用いた。使用した熱起電力 V [mV] と測温接点温度 T [$^{\circ}\text{C}$] の関係式を式 (5.2) に示す。なお、 T_0 [$^{\circ}\text{C}$] は計測器側接点の温度、 k は比例定数である。比例定数 k については JIS C 1602 に記載された K 型熱電対の 0°C から 600°C までの規準熱起電力を元に最小二乗法による直線近似により傾きを求めそれを使用した。

$$T = kV + T_0 \quad (5.2)$$

表 5.6、表 5.7 にそれぞれ基準接点温度と加工面温度の測定条件を示す。基準接点温度 T_0 の測定には、熱電対用の計測ユニット (KEYENCE NR-TH08) を使用した。一方、加工面温度 (熱起電力 V) の測定にはひずみ計測ユニット (KEYENCE NR-ST04) を使用した。これは、研削時に砥石が測定箇所を通過する時間は数百 ms ~ 数 s 程度であり、最大サンプリング周波数が 10 Hz の NR-TH08 では計測に必要なサンプリング周波数が設定できなかったためである。なお、NR-ST04 を用いた加工面温度の計測ではサンプリング周波数を 1 kHz に設定した。

Table 5.6 Measurement conditions of reference junction temperature

Measuring unit	NR-TH08(KEYENCE)	
Maximum sampling frequency	Hz	10
Sampling frequency	Hz	10
Resolution	bit	16
Range	V	±50

Table 5.7 Measurement conditions of machined surface temperature

Measuring unit	NR-ST04(KEYENCE)	
Maximum sampling frequency	kHz	50
Sampling frequency	kHz	1
Resolution	Bit	16
Range	mV	±50

5.6.2 感温部が長球形状の熱電対との比較

5.6.2.1 実験方法

加工温度の測定方法として先行研究で多く使用されている、加工物に熱電対を埋め込んだ温度測定手法との比較を行った。はじめに感温部が長球形状の K 型熱電対大晃電工 K-G 0.32 φ を試験片に埋め込む手法との比較を行った。なお、感温部は K 型被膜熱電対線(大晃電工 K-G 0.32 φ)のクロメル線とアルメル線をスポット溶接機で溶接し作製した。図 5.26 に熱電対の感温部を、図 5.27 に熱電対が埋め込まれた試験片と、溝先端の拡大図を示す。熱電対の感温部を溝先端に接触させた状態でセットし、接着剤で固定した。また溝先端部には高熱伝導率を有する絶縁性のシルバークリス(熱伝導率: 9.0 W/m・K)を充填し熱伝導のロスを低減するとともに、測温部の熱容量が極度に小さくなることを防いだ。実験では溝加工を施し、熱電対を埋め込んだ CFRP プレートに、未加工のもう一枚のプレートを重ねて、接着し使用した。

図 5.28 に 2 つの温度測定手法の比較を行う実験のセットアップを、表 5.8 に実験条件を、図 5.29 に加工の様子を示す。1 パスあたりの切込み深さを 0.02 mm とし、繰り返し CFRP の端面研削加工を行った。そして図 5.28 における③のパスが切込み量の 0.02 mm 以内に接近した距離における加工面直下の温度となるので、この温度と赤外線放射温度計を用いた手法の温度測定結果の比較を行う。砥石は長径が 18 mm の長い丸穴と φ18 の穴をそれぞれ 2 つずつ設けた Type B を使用した。切込み深さが 0.02 mm では、赤外線放射温度計の測温部の位置が接触弧側と中央の場合、接触弧長さが小さく加工前の被削材表面の温度を含めて計測するため、測温部の位置は仕上げ面側に設定した。研削方向はダウンカットで一定とし、1 パスごとに十分に時間を空けてから次のパスの加工を行った。

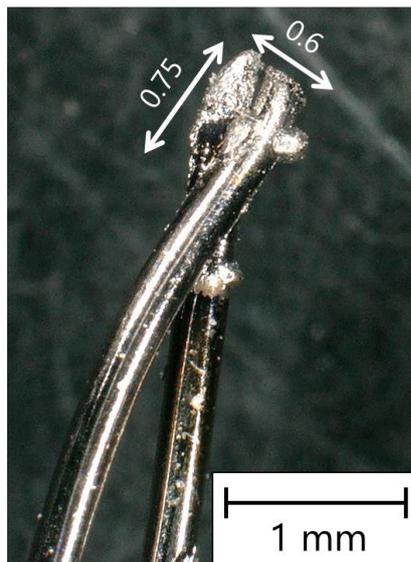
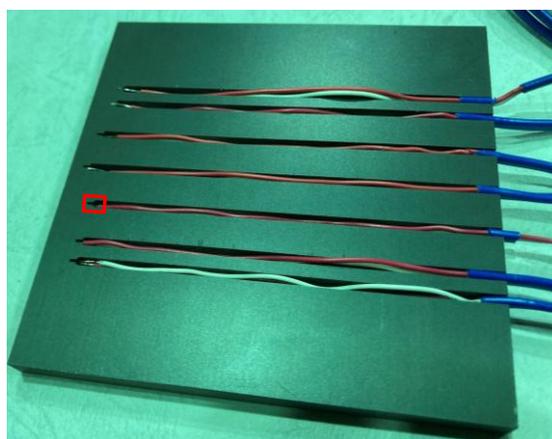
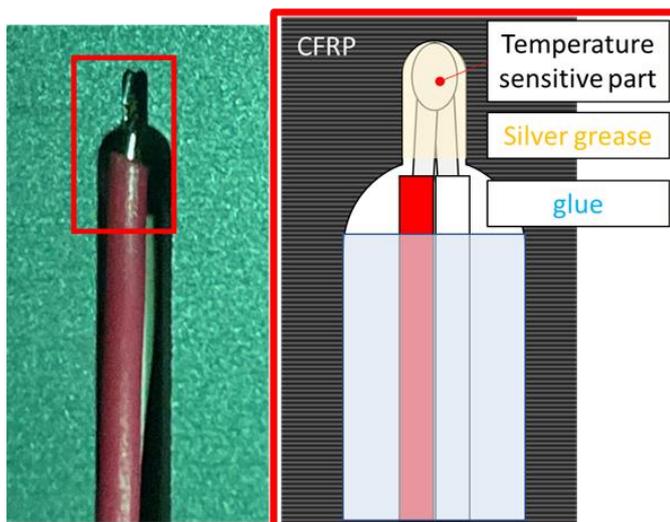


Fig. 5.26 Temperature sensitive point of thermocouple



(a) Workpiece



(b) Enlarged view

Fig. 5.27 CFRP plate with embedded in K-type thermocouple

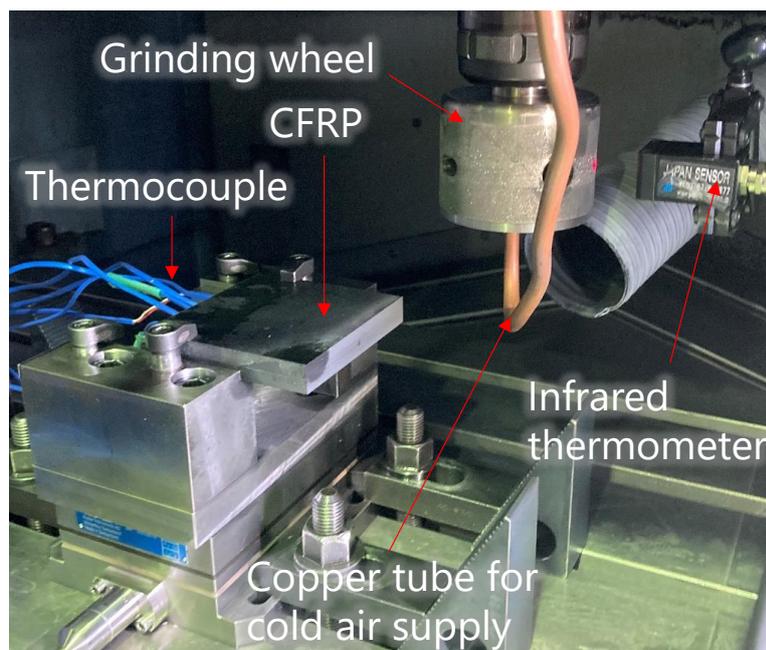


Fig. 5.28 Experimental set-up

Table 5.8 Grinding conditions

Grinding wheel		Type B
Optical holes on type B		$\Phi 18 \text{ mm} \times 2$ and oval holes with a major axis of 18 mm
Rotation speed	r/min	4500
Grinding speed	m/s	19.8
Feed rate	mm/min	2000
Depth of cut	mm	0.02
Grinding direction		Down cut
Grinding condition		Internal cold air supply
Emissivity of CFRP		0.952
Temperature measurement position		Finished surface side
Air volume	L/min	464

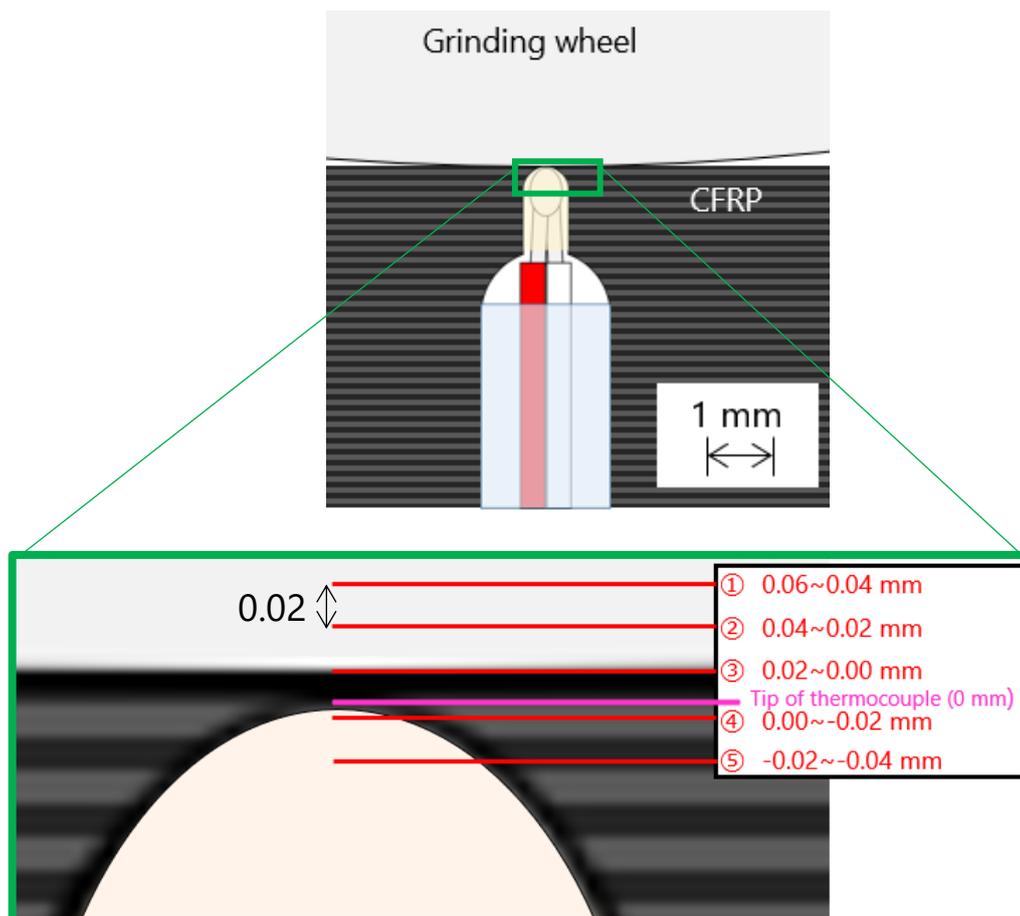


Fig. 5.29 Grinding flow

5.6.2.2 実験結果

図 5.30 に各パスにおける熱電対での温度測定結果と、同じ条件での赤外線放射温度計を用いた手法の平均ピーク温度を示す。赤外線放射温度計を用いた手法の平均ピーク温度に比べて、熱電対を用いた手法の③のパスにおける最高温度の方が約 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低い結果となった。これは主に 2 つの要因が考えられる。1 つ目は、感温部と溝先端の接触面積が小さく、感温部への入熱量が少なかったこと、2 つ目は、感温部が出力するのは感温部全体の平均温度であるため、主な熱の流入経路が接触領域からのみであることで、接触領域よりも感温部全体の温度が低くなったためであると考えられる。また④、⑤のパスの最高温度は③のパスよりも高い結果となった。これは感温部自体が削られたこと、感温部の熱容量が小さくなったことが原因として挙げられる。

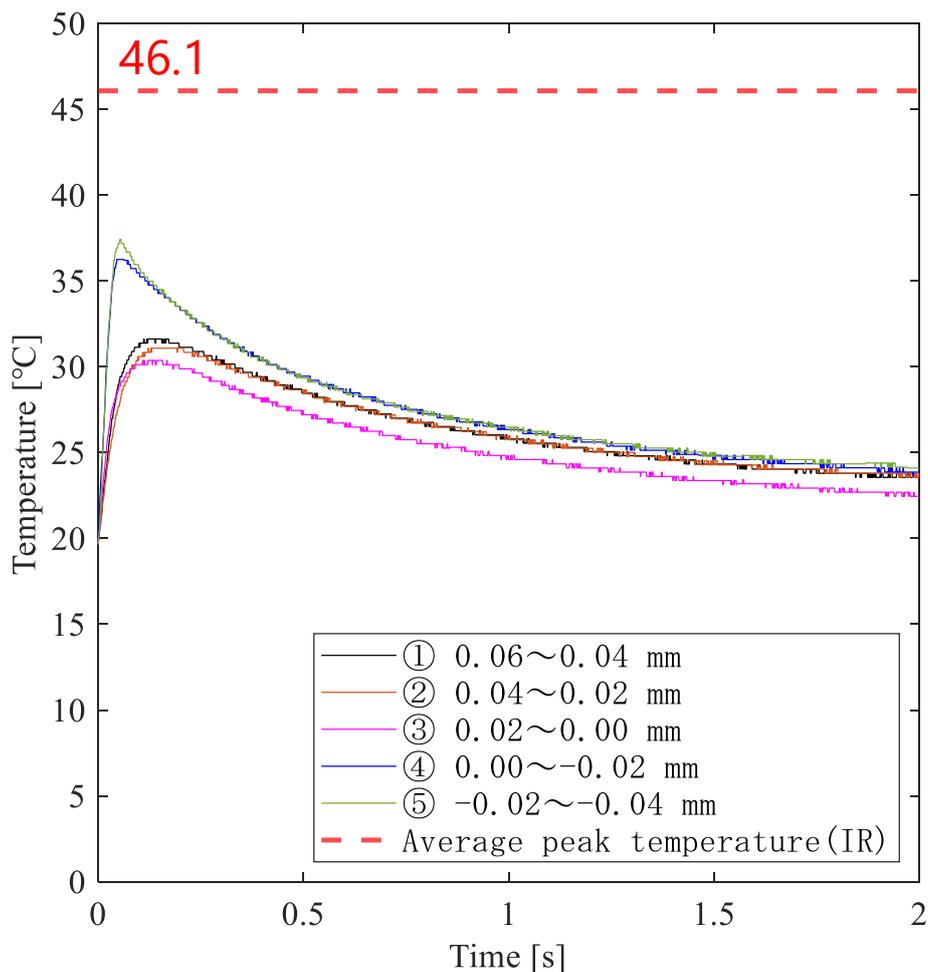


Fig. 5.30 Temperature measurement results of the two methods

5.6.3 感温部が薄型形状の熱電対との比較

5.6.3.1 実験方法

長球形状の熱電対では、物体表面の温度測定時、感温部に熱が流入しにくい問題があったため、素線径を 0.32 mm から 0.1 mm に小さくすることで熱容量を小さくし、また先端を厚みが 0.04 mm の薄型の形状にすることで、密着性を向上させ、感温部を含めた熱電対の先端全体に熱が流入するようにした。なお実験は、表 5.8 と同様の条件で行い、赤外線放射温度計を用いた温度計測手法との比較を行った。図 5.31, 5.32 に使用した薄型の K 型熱電対（アンベエスエムティ KST(SF)-40-100-200）と熱電対を埋め込むために溝加工を施した CFRP プレートをそれぞれ示す。熱電対先端は長径が約 10 mm のダイヤ型であり、クロメル・アルメルの 2 本の素線が交わる、一番先端の感温部以外で、素線が接触しないようになっている。また、感温部の大きさは、図 5.26 の感温部が長球形状の熱電対よりもさらに小さくなっている。図 5.33 に熱電対の設置の様子を示す。②のように試験片の厚み方向と熱電対先端の長手方向が平行となる様にアルミテープで溝先端に貼り付けた。溝の空間が開いたままの状態では熱容量が小さくまた被加工材内部への熱拡散が妨げられるため、バルクの

CFRP 材を加工する際の温度よりも高く測定されることが予想されるため、同図③のように溝幅と同じ幅の CFRP の端材を熱電対の裏側から押し当て、接着剤で固定した。

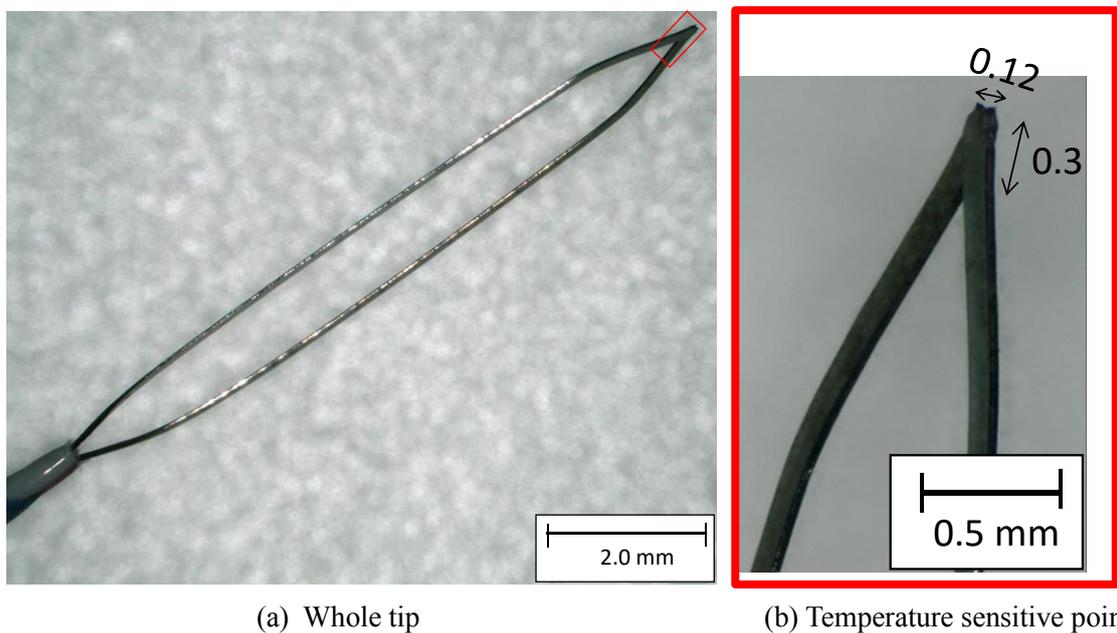


Fig. 5.31 Sheet type thermocouple

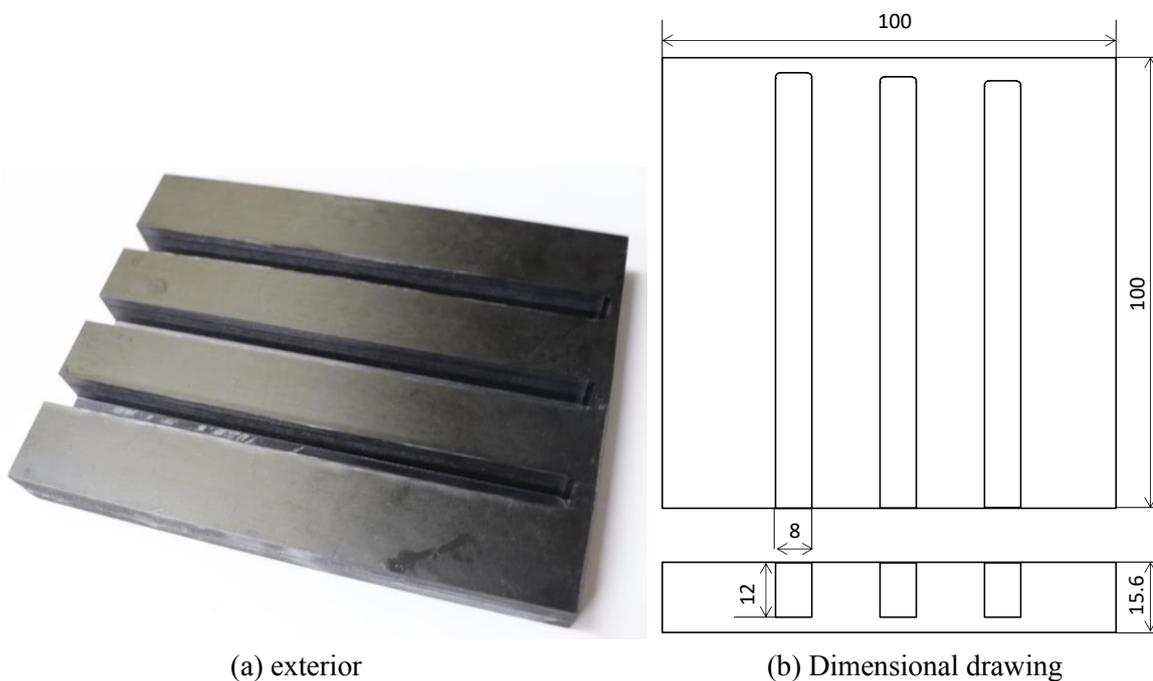


Fig. 5.32 Grooved work piece

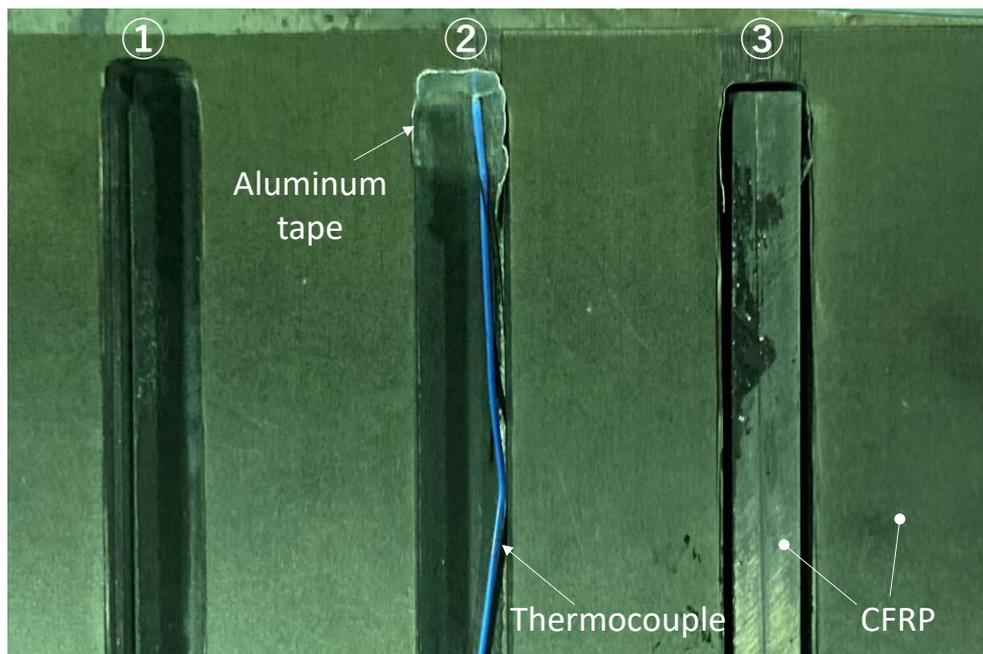


Fig. 5.33 Installation procedure of thermocouple

5.6.3.2 実験結果

図 5.34 に 2 つの温度測定手法の測定結果を示す。なお薄型の熱電対を用いた手法の温度測定結果は切込み量の 0.02 mm 以内に接近したパスにおける研削面裏側の温度であり、区間数 20 の移動平均をとった結果を示している。薄型の熱電対を用いた手法と赤外線放射温度計を用いた温度計測手法の平均ピーク温度の差は約 $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ となった。図 5.35 に実験と同じ条件の場合の、送り方向の研削面の温度分布の数値解析結果を、図 5.36 に测温部位置が仕上げ面側の場合の测温部の 2 次元の温度分布を示す。数値解析で求めた仕上げ面上 $\phi 8 \text{ mm}$ における平均温度は $53.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ となり、実測値の平均ピーク温度と同等となった。一方、数値解析での研削面の最高温度は約 $130 \text{ }^{\circ}\text{C}$ となっており、熱電対を用いた測定値の最高温度と大きな差が生じた。これには主に二つの要因があると考えられる。一つ目は熱電対の感温部には、ある程度の熱容量があり応答速度が十分でなかったことから、図 5.35 に示したような研削面の急峻な温度変化に追従できなかったためであると考えられる。二つめは CFRP の熱伝導率は $3.17 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ と金属材料に比べて低く(炭素鋼 S45C の熱伝導率は $45.0 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), また熱電対による温度測定結果は加工表層から $0.00\sim 0.02 \text{ mm}$ 離れた深さにおける温度であり、研削面表層から溝先端までの CFRP の内部では温度勾配が生じているため、真の研削面表層の温度よりも実測値は低くなったと考えられる。数値解析のような温度波形を熱電対を用いた手法で得るには、感温部の熱容量を限りなく小さくし、また加工面に限りなく接近した位置で測定する必要があるが、実験技術上、実現は困難である。以上の理由より、熱電対を用いた温度測定手法は真の研削面表層の温度よりも低く測定されるため、赤外線放射温度計を用いた手法の温度結果の妥当性の検証はできなかった。

赤外線放射温度計を用いた手法と熱電対による手法を比較した結果、熱電対による手法

は所望の位置に熱電対を設置することが難しく、また熱電対の感温部の接触の具合によって測定誤差が生じる恐れがある。一方、赤外線放射温度計を用いた手法はセンサを容易に設置が可能であり、研削面と砥石表面の温度を連続して計測できるため、測定の簡便さとインプロセスで加工面の温度を計測可能な点では赤外線放射温度計を用いた手法の方が優れている。ただ、研削液を使用するウェットな環境において、加工温度を計測する場合には熱電対を用いた手法が適していると考えられるが、センサー（赤外線放射温度計）内蔵の砥石になれば、光路長が本研究の 100mm から砥石の厚み 5mm 程度までセンサーが研削点に接近するので、防塵、防水の設計は格段に容易となりドライとウェットの併用の可能性も高いと予想している。

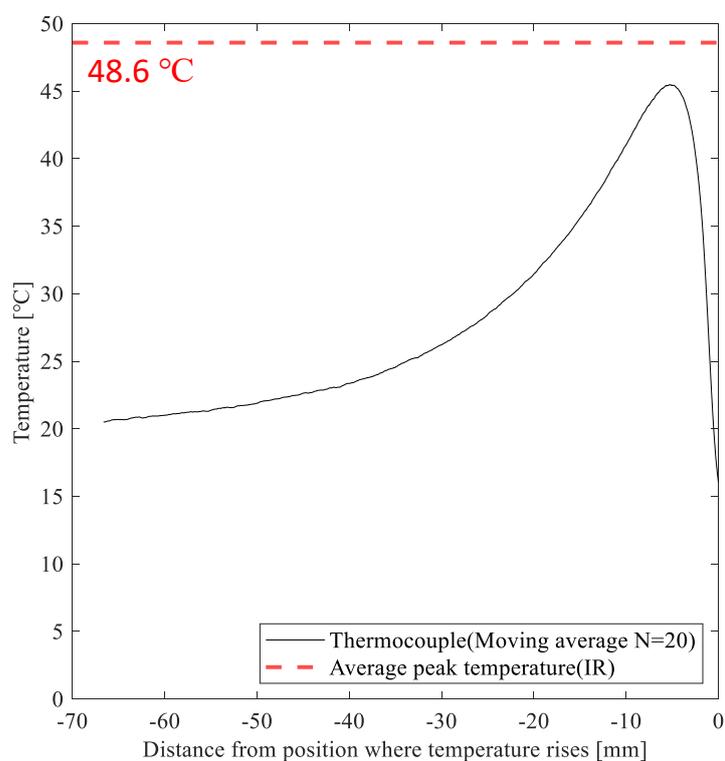


Fig. 5.34 Temperature measurement results of the two methods

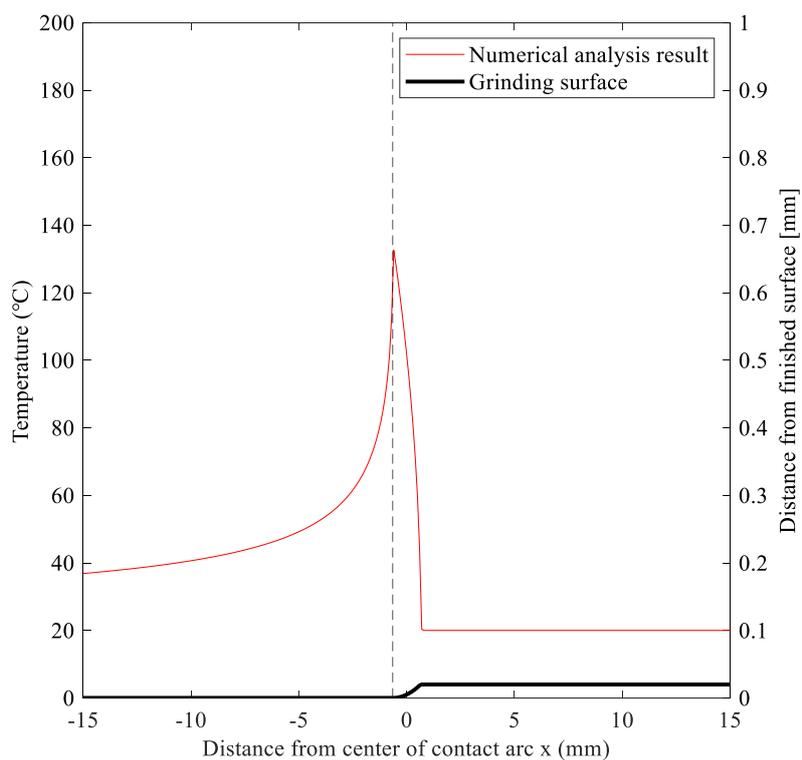


Fig. 5.35 Temperature measurement results of the two methods

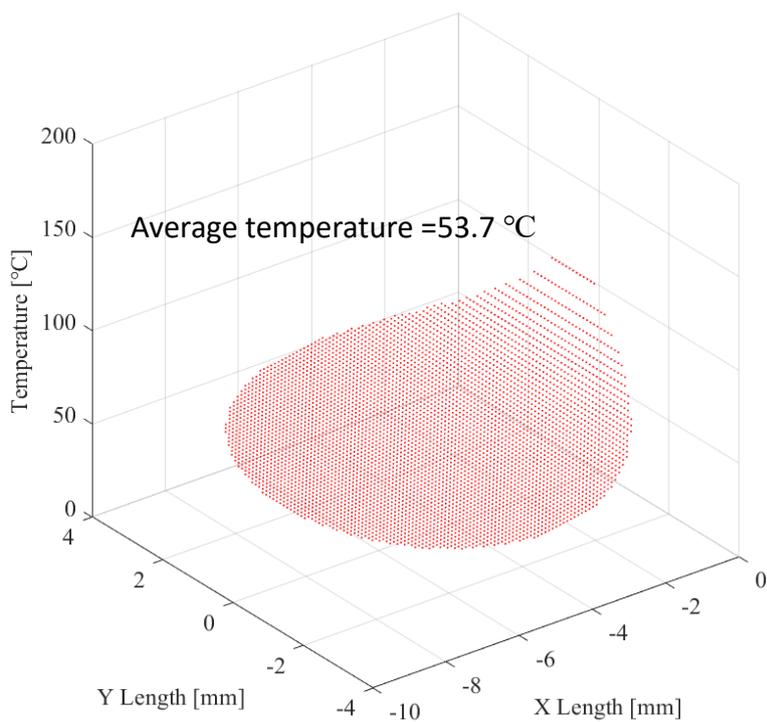


Fig. 5.36 Temperature measurement results of the two methods

5.7 加工の異常の検知への適用

5.7.1 研削抵抗の測定方法

研削抵抗の測定には様々な方法が考案されている。ひずみゲージ式・半導体ゲージ式・圧電素子式の圧力変換器を用いて油圧の変化を力として検出する方法や、電流計を用いて研削抵抗によるモータ電流を電磁誘導の原理で計測する方法、過電流変位計を用いコイルに流した高周波電流で誘導された金属表面の過電流を検出する方法、電気マイクロメータを用いて先端子の移動変位をトランスの電磁誘導で検出する方法、さらに静電容量型変位計を用いて高周波電界を発生させた先端子と対象物間の静電容量を計測する方法などが存在する⁽⁵⁶⁾。

本研究では、それらの中でも特に高剛性、高精度と優れた特徴を持つ水晶圧電式三成分動力計（KISTLER 9257B）を用いた。動力計の出力は分岐ボックス（KISTLER 5407A）を介してチャージメータ（KISTLER 5015A）に接続されている。表 5.9 に動力計の諸元を、表 5.10 にチャージメータの諸元を示す。

図 5.36 に示す座標系について、矢印の向きを正とし接線研削抵抗： F_x 、垂直研削抵抗： F_y 、軸方向研削抵抗： F_z の三成分を測定した。動力計の出力は、分岐ボックス（KISTLER 5407A）、チャージメータ（KISTLER 5015A）を介してデータロガー（KEYENCE NR-600）に入力し、これをさらにパソコンに入力して観測ソフト（WAVE LOGGER PRO）を用いてデータを収集した。測定条件を表 5.11 に示す。

Table 5.9 Specification of dynamometer

Specifications	9257B (KISTLER)		
Measuring Range	F_x, F_y, F_z	kN	± 5
Sensitivity	F_x, F_y	pC/N	≈ -7.5
	F_z	pC/N	≈ -3.7
Natural Frequency	$f_0(x,y,z)$	kHz	≈ 3.5
Operating temperature range		°C	0 ~ 70
Length		mm	≈ 170
Width		mm	≈ 140
Height		mm	≈ 60
Connection	Fischer 9 pol. Neg.		
Sealing	welded/epoxy (IP67) with connecting cable Types 1687B5, 1689B5		
Mass		kg	7.3

Table 5.10 Specification of chagemeter

Specifications	Type 5015A00X0	
Model	19" rack module	
Adjustment	with serial interface RS-232C	
Measuring range	pC	±2 ~ ±2200000
Frequency Range	kHz	≈ 0 ~ 200
Output signal	V	±10 ~ ±2
Accuracy	%	< ±3
Supply	115/230 VAC switch able	
Operating temperature range	°C	0 ~ 50
Mass	kg	2.3
Connection	BNC neg. Output: BNC neg.	
Width	mm	105.3
Height	mm	142
Depth	mm	253.2

Table 5.11 Measurement conditions of grinding force

Dynamometer	9257B (KISTLER)		
Charge meter	5015A (KISTLER)		
Date logger	NR-600 (KEYENCE)		
Measuring unit	NR-CA04 (KEYENCE)		
Data acquisition software	WAVE LOGGER PRO (KEYENCE)		
Sampling frequency	kHz	1	
Sensitivity	F_x	pC/N	-7.851
	F_y	pC/N	-7.874
	F_z	pC/N	-3.765
Range	N	±1000	

5.7.2 実験方法

研削加工では加工するにつれて、切りくずが砥粒の隙間を埋める目づまりや、砥粒の切れ味が低下する目つぶれが生じ、加工温度が上昇する。そして加工温度が著しく上昇すると、熱変形による寸法誤差や研削焼けによる材料の変質が発生する。したがって、このような加工時の異常やその予兆を、研削温度の変化から検知することができれば、異常が起こる直前の最適なタイミングで砥石の交換等の対応をすることが可能となる。そこで赤外線放射温度計を用いた温度計測手法が研削加工時の異常の検知に有効であることを検証した。図 5.37 に実験のセットアップを、表 5.12 に実験条件を示す。砥石は小穴の径が $\phi 10$ の Type A を使用し、普通では有り得ない切込み深さを 1.0 mm、にして 1 パスあたりの研削距離を

100 mm とし, CFRP の端面研削加工を行った.

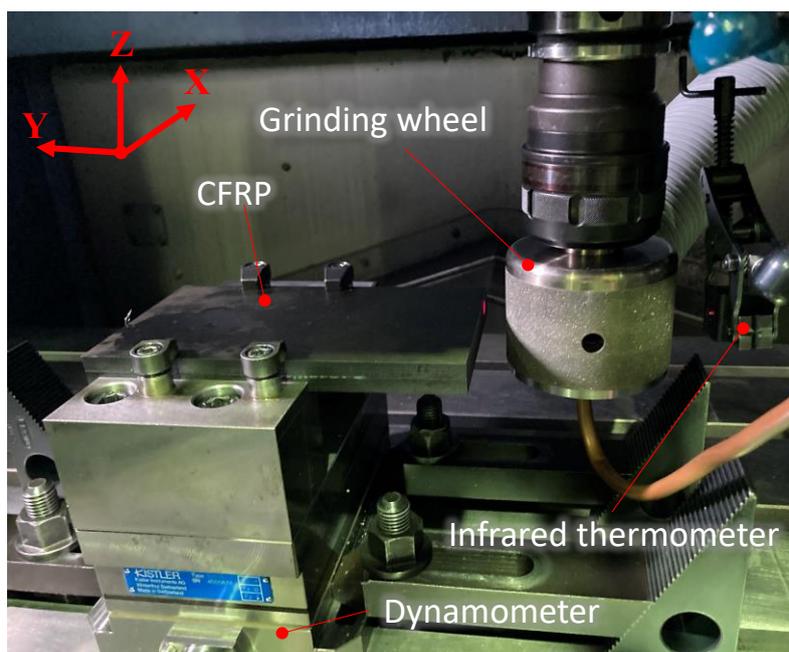


Fig. 5.37 Experimental set-up

Table 5.12 Grinding conditions

Grinding wheel		Type A
Optical holes on type A		Φ10×4
Rotation speed	r/min	2000
Grinding speed	m/s	8.8
Feed rate	mm/min	1000
Depth of cut	mm	1
Grinding distance	mm	100 mm×2 path
Grinding direction		Down cut
Grinding condition		Internal cold air supply
Emissivity of CFRP		0.952
Temperature measurement position		Center
Air volume	L/min	464
Air temperature	°C	13
Sampling rate	kHz	50

5.7.3 実験結果

1 パス目では, 加工面に損傷は発生せず, 正常に加工が行われたが, 2 パス目では, 図 5.38 のように CFRP が砥石全周に溶着し, 砥石が激しく目づまりした. また図 5.39 のように加工開始点付近では加工面に損傷は生じなかったが, 加工途中からファイバーアウトが生じた.

図 5.40 に異常が発生しなかった 1 パス目と、図 5.41 に異常が発生した 2 パス目の温度と研削力の波形をそれぞれ示す。加工中全体の波形より、1 パス目では加工中、研削力、研削面温度ともに大きな変化はなかったのに対し、2 パス目では加工途中から研削力、研削面温度と砥石表面温度が急激に上昇していることが分かる。2 パス目の 0.9 s 付近の温度波形は 1 パス目の温度波形と同様に、研削面温度は約 130 °C、砥石表面の温度は砥石表面の放射率で換算して約 33~37 °C であった。一方、その直後の 1.0 s 付近では、研削面と砥石表面の温度は 0.9 s 付近のときとほとんど変わらないが、砥石表面温度の測定時に温度波形に小さな山が発生し、通過した瞬間の砥石と CFRP を見ることで再現することは不可能だが、砥石表面の一部が目づまりし、その他の砥石表面に比べて、放射率が高くなったことと、切れ味が低下し砥石表面温度が上昇したこと以外の要素は考えられなく原因であると考えている。その後、2.5 s 付近では研削面温度は約 250 °C、砥石表面温度は 100 °C 以上まで上昇し、4.1 s 付近では研削温度は 450 °C、砥石表面の温度は 200 °C 以上まで上昇し、加工後の CFRP 加工面は予想通り激しく損傷していた。

以上のとおり、砥石の目づまりが生じると、研削面と砥石表面の温度は共に上昇するため、赤外線放射温度計を用いた温度計測手法は、この 2 つの温度上昇から目づまりを検知することが可能であると考えられる。また目づまりの発生時、研削力も急激に上昇しているが、1.0 s 付近の温度波形で見られた、砥石表面温度測定時の波形の小さな山の発生のような変化は、研削力の波形からは見られない。従来例えば熱電対による観測では砥石表面のリアルタイムな温度変化のモニタリングは困難であったが、本研究では異常のシグナルが容易に提供できた。この波形の小さな山の発生が目づまりの検知をする上で、研削力の測定に対する優位性であると考えられる。

ただし、シグナル、アラームなので直接的に異常原因を特定し対処することはできない。

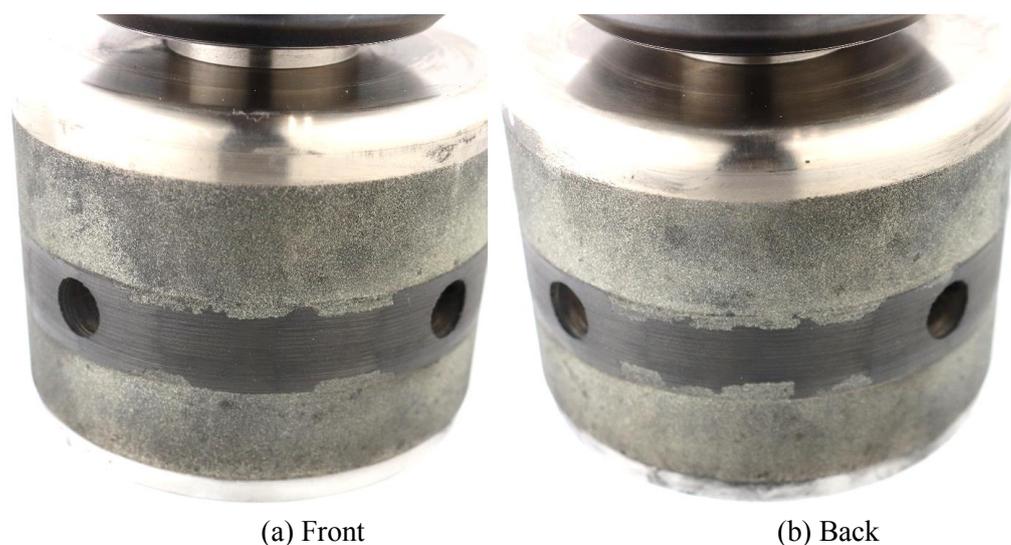
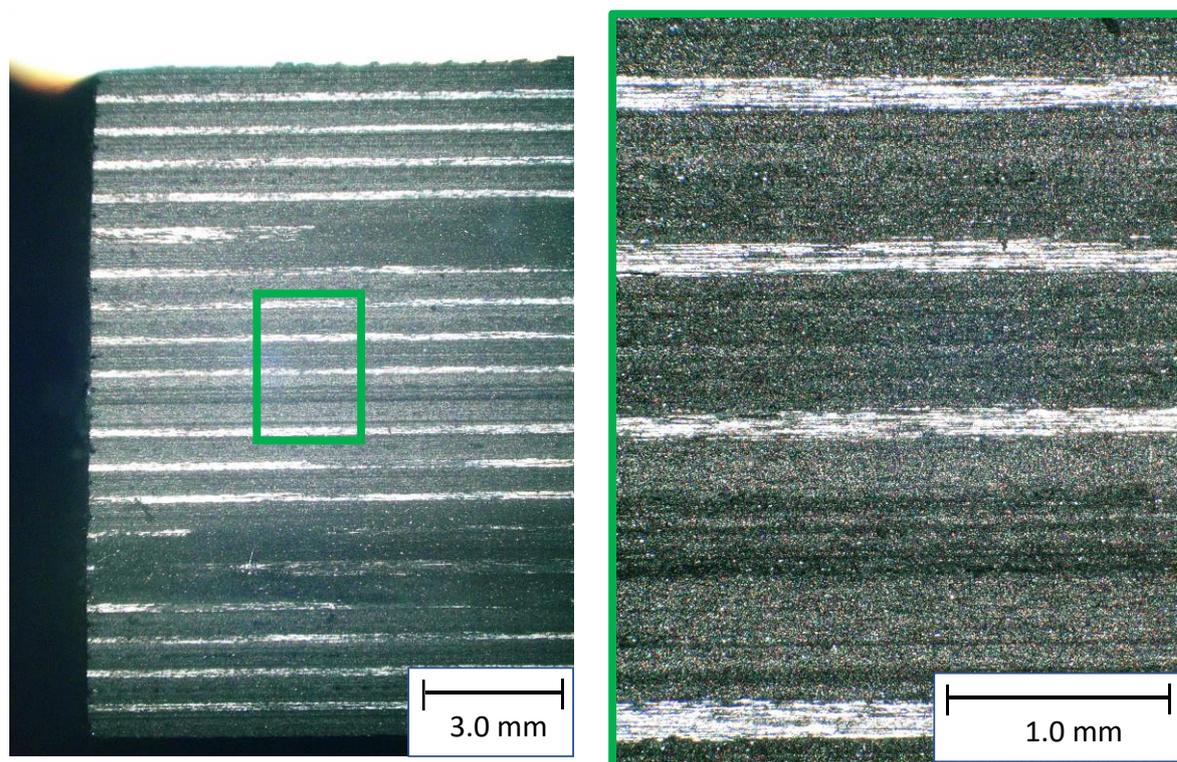
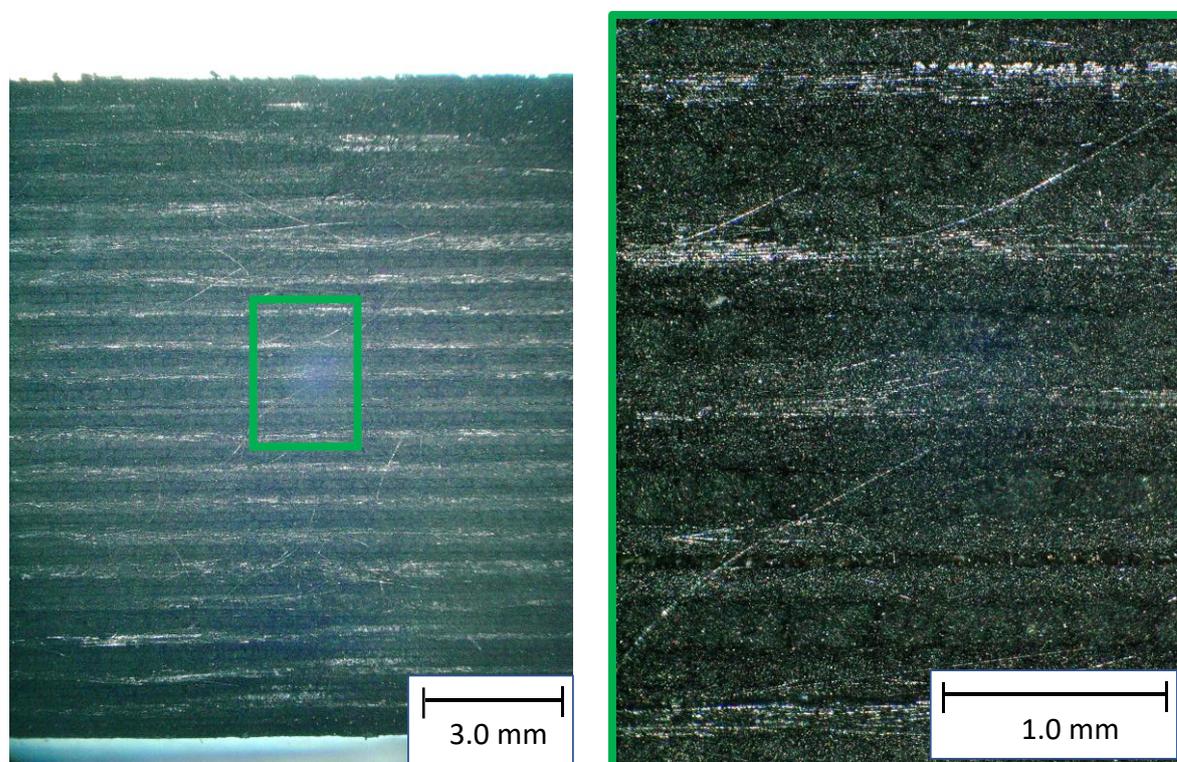


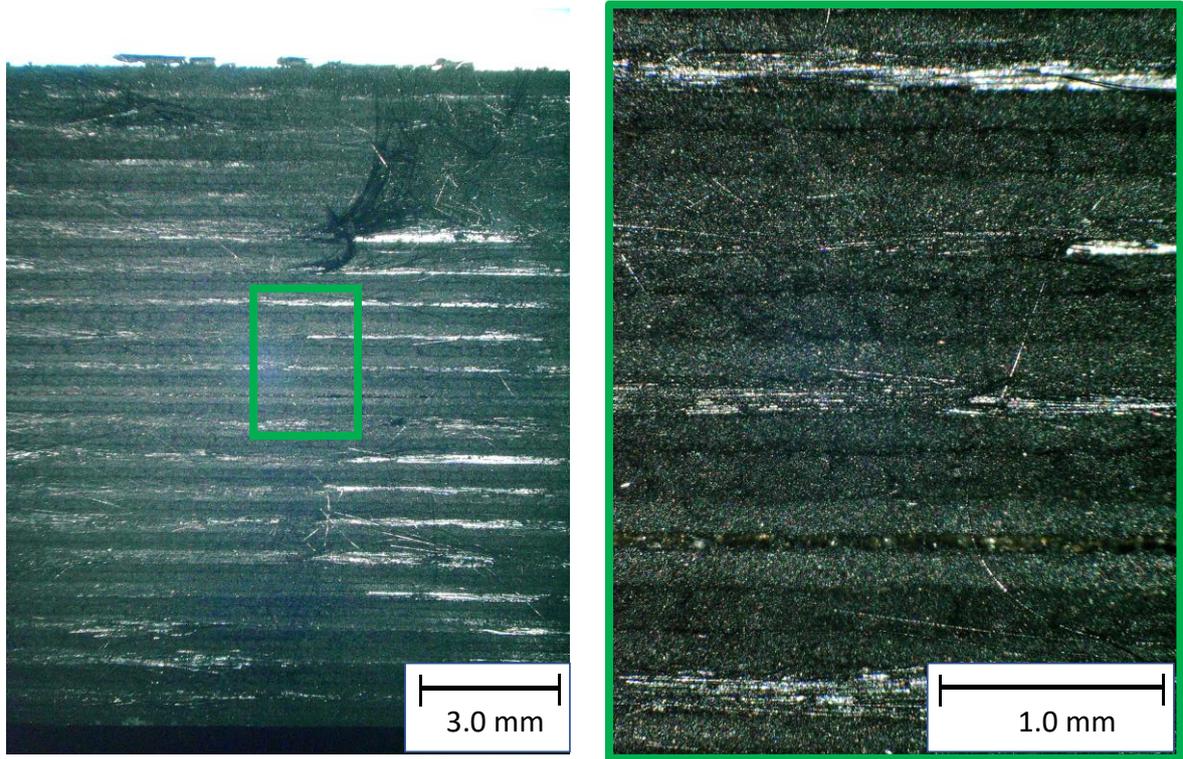
Fig. 5.38 Grinding wheel after machining



(a) Near the grinding start point

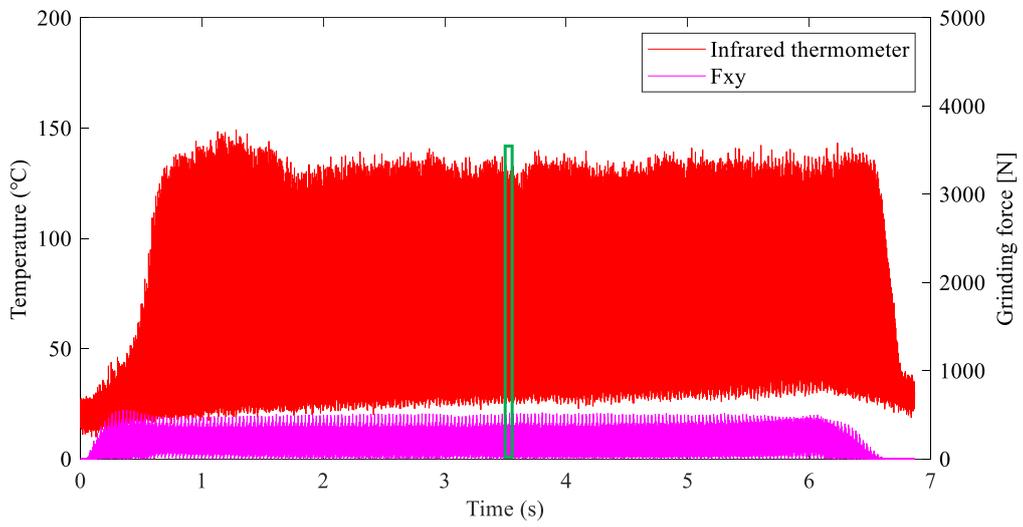


(b) Near 70 mm from grinding start point

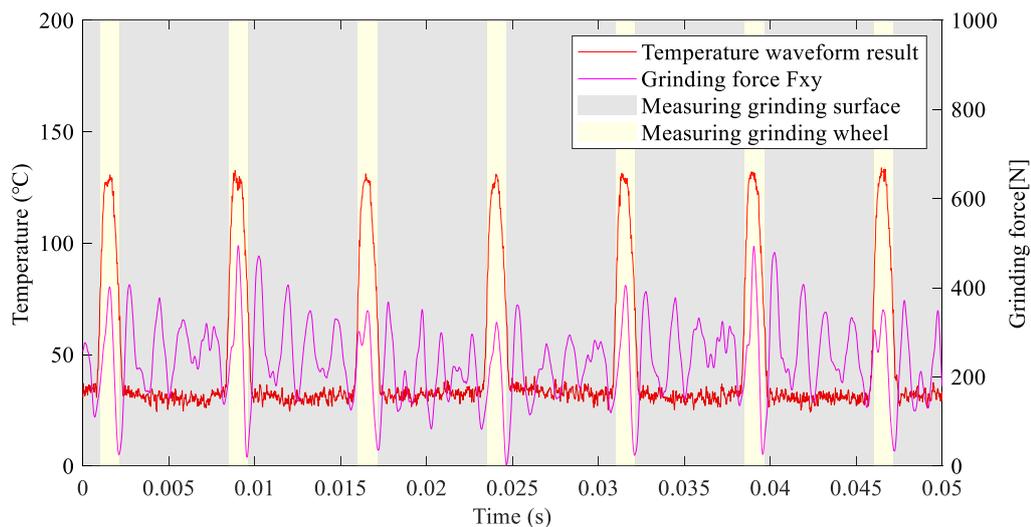


(c) Near 90 mm from grinding start point

Fig. 5.39 Machined surface of CFRP

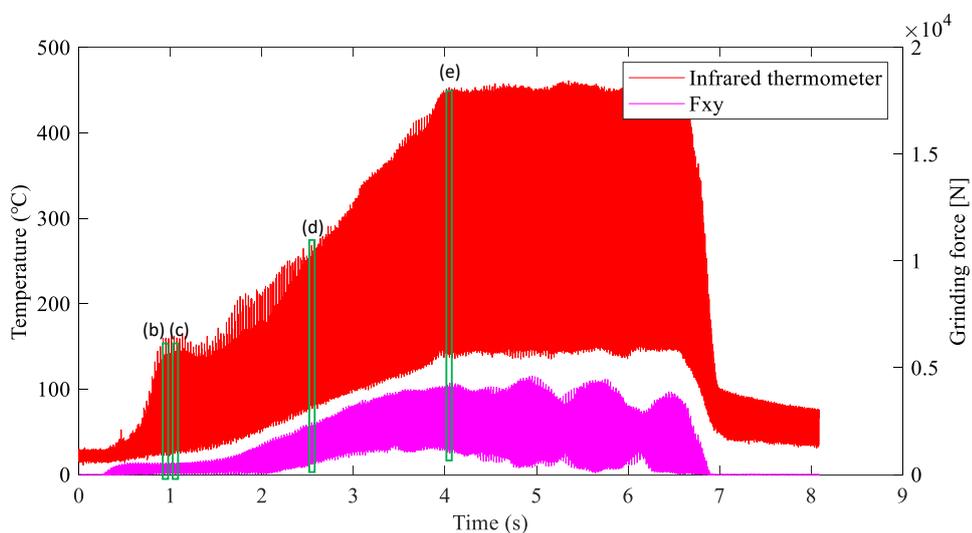


(a) Entire grinding

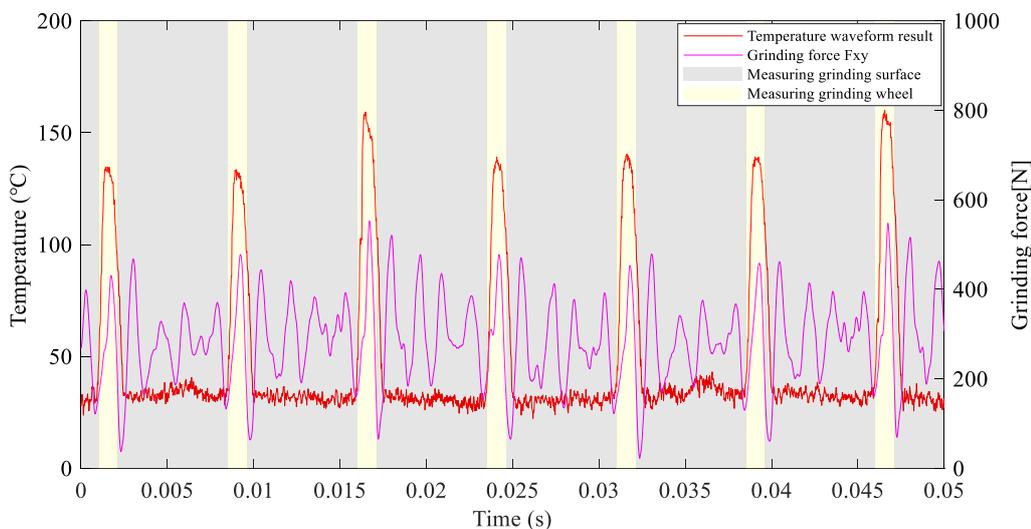


(b) 3.5 s

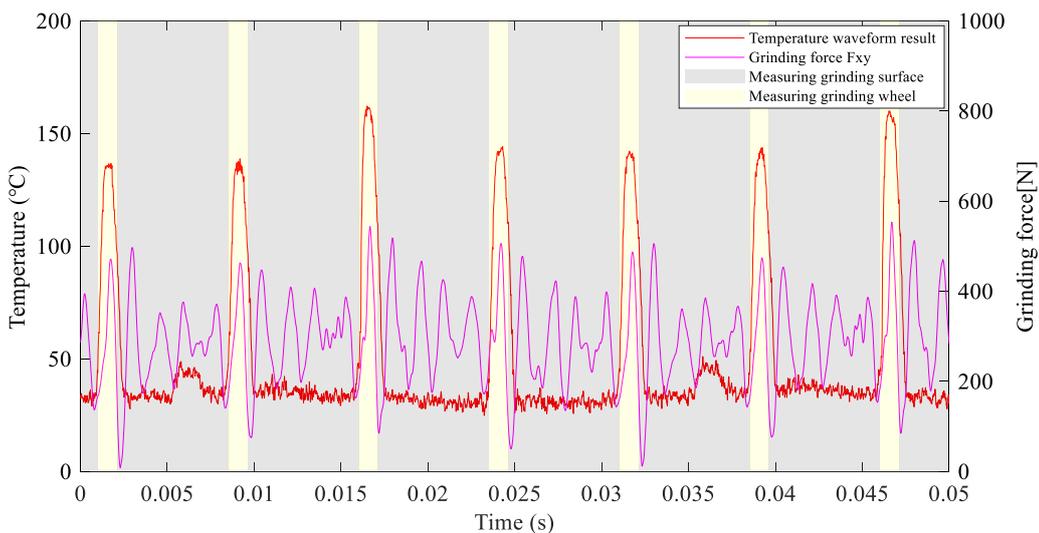
Fig. 5.40 Results of temperature and grinding force (1path)



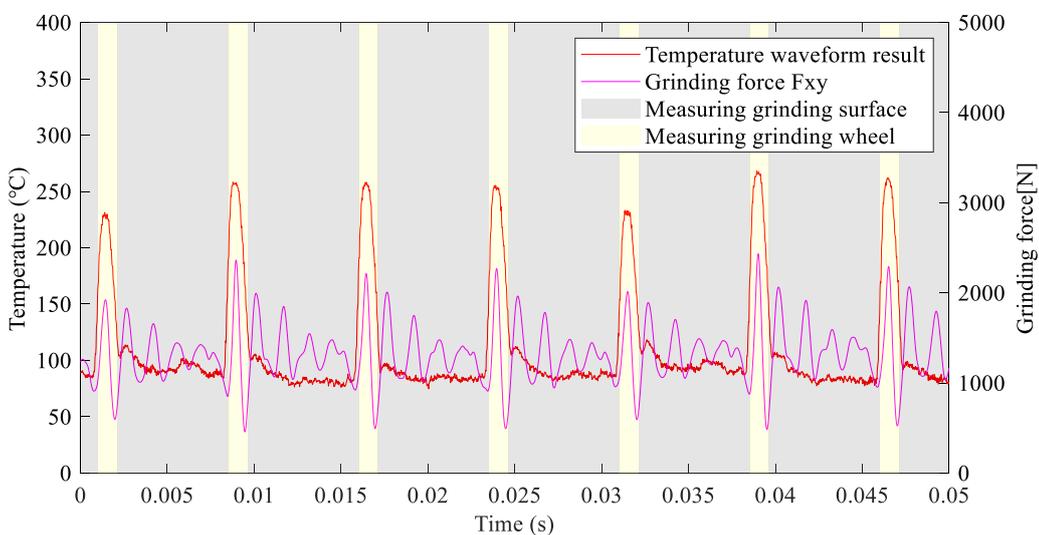
(a) Entire grinding



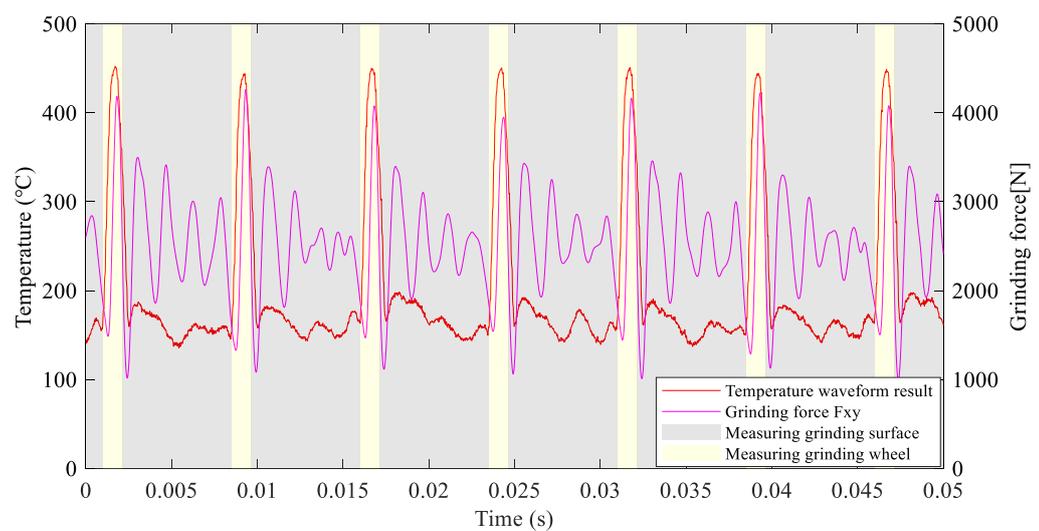
(b) 0.9 s



(c) 1.0 s



(d) 2.5 s



(e) 4.1 s

Fig. 5.41 Results of temperature and grinding force (2 path)

5.8 一般砥石への適用

5.8.1 小穴付きビトリファイド砥石

赤外線放射温度計と、小穴を設けた電着砥石を用いて加工面と砥石表面の温度を計測できることが分かった。続いては、市場規模の大きな一般砥石においても赤外線放射温度計を用いた温度計測手法が有効であることを検証し適用範囲の拡大を目指す。

図 5.42 に赤外線放射温度計の光路用の小穴が設けられたビトリファイド砥石, 図 5.43 にその取付具を示す。砥石外径と厚みは電着砥石と同様で、外周面に2つ $\phi 18$ の小穴が工具軸に垂直に対角線上に設けられている。

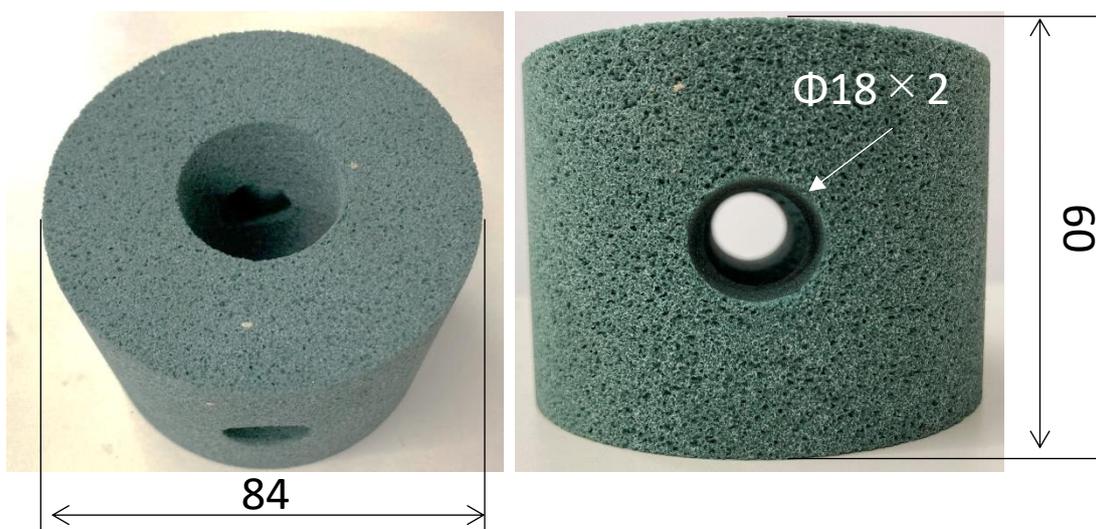


Fig. 5.42 Vitrified grinding wheel



Fig. 5.43 Mounting tool for vitrified grinding wheel

5.8.2 ドレッシング

加工前の砥石に振れがあったため、ドレッシングを行った。単石ドレッサを図 5.44 に示す。加工実験は汎用のマシニングセンタで行うためドレッシングには図 5.45 に示すようなドレッサ固定ジグを使用した。固定ジグ本体をマシニングセンタテーブルに直接固定できるようにし、単石ドレッサは固定ジグ側面から止めねじによって固定されている。表 5.13 にドレッシングの条件を示す。

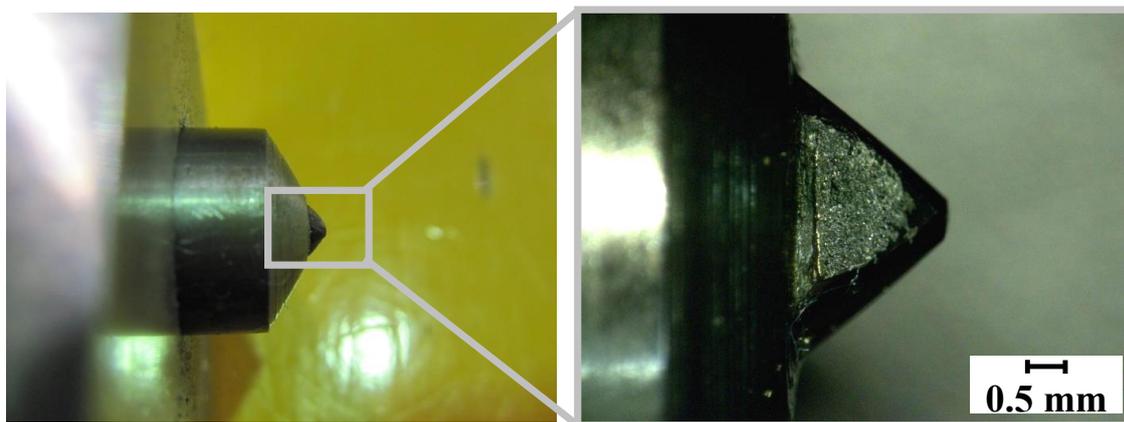


Fig. 5.44 Dresser



Fig. 5.45 Dressing jig

Table 5.13 Dressing condition

Rotation speed	r/min	4500
Grinding speed	m/s	19.8
Feed rate	mm/min	500
Depth of cut (Total)	mm	0.2

5.8.3 実験方法

図 5.46 にビトリファイド砥石での研削面の温度測定実験のセットアップ, 表 5.14 に実験条件を示す. 送り速度と砥石周速度は一定にし, 切込み深さを 0.02, 0.2, 1.0 mm と変化させて CFRP の端面研削加工を行った際の研削面温度を赤外線放射温度計を用いた手法で測定した. なお, 砥石内冷風供給は, 取付具に冷風供給用の通り道を設けていないため, 本実験では適用していない. また赤外線放射温度計の测温部の位置は仕上げ面側に設定している.

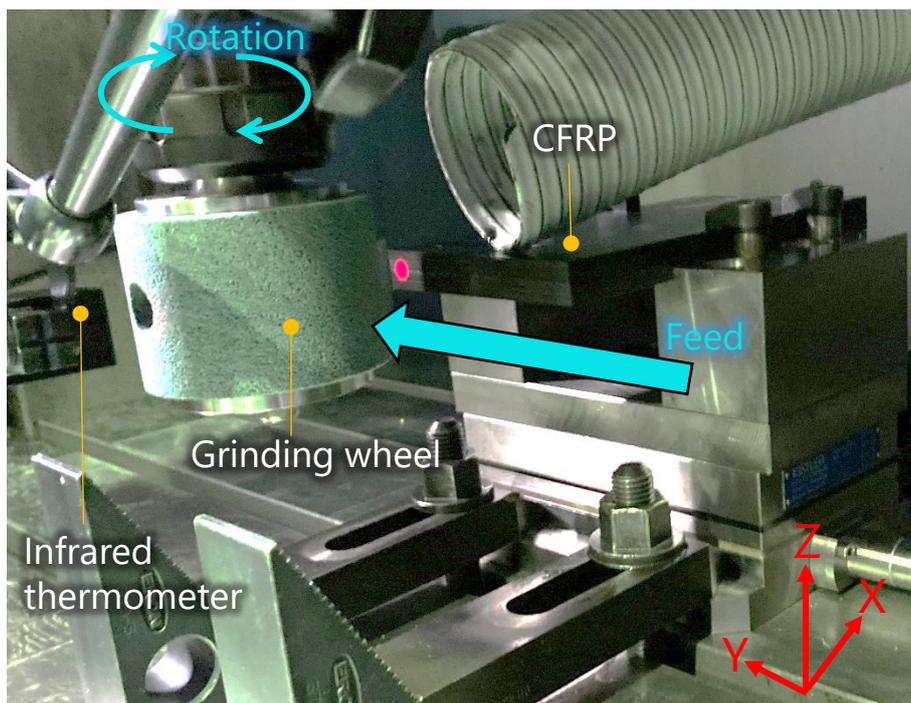


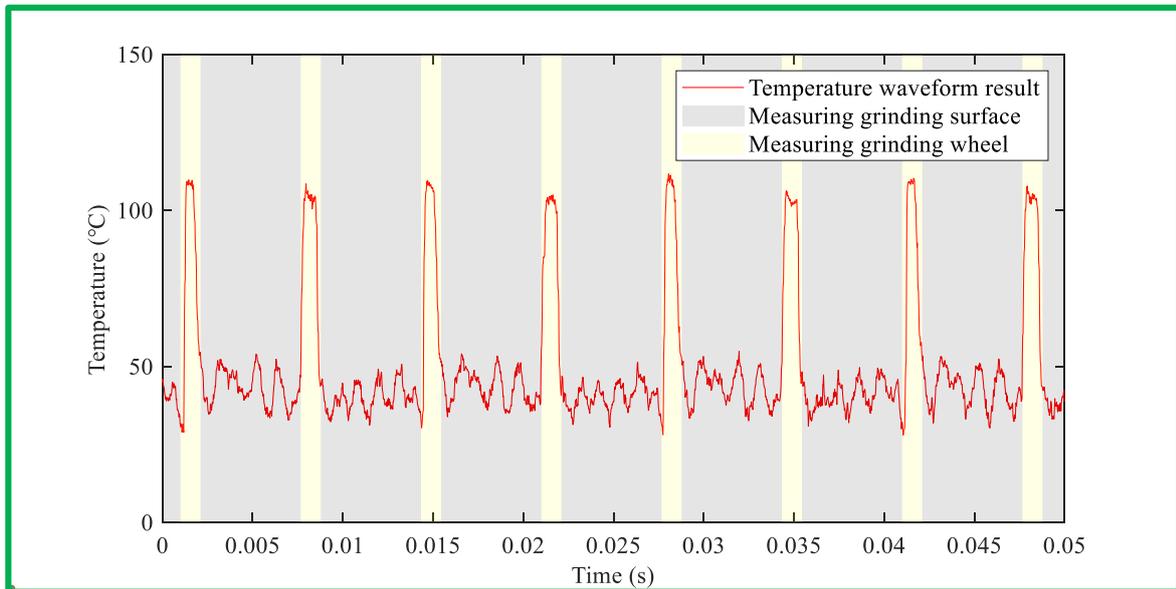
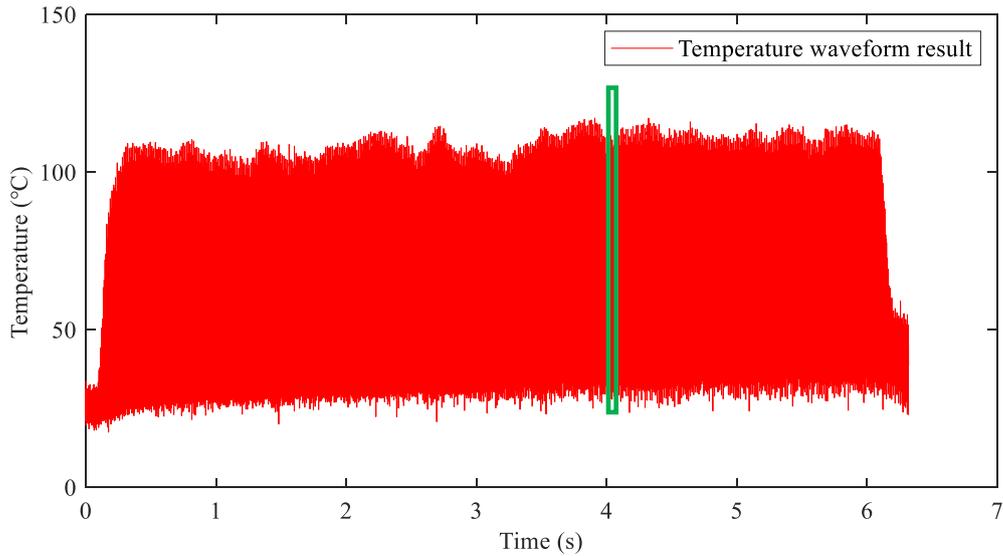
Fig. 5.46 Experimental set-up

Table 5.14 Grinding condition

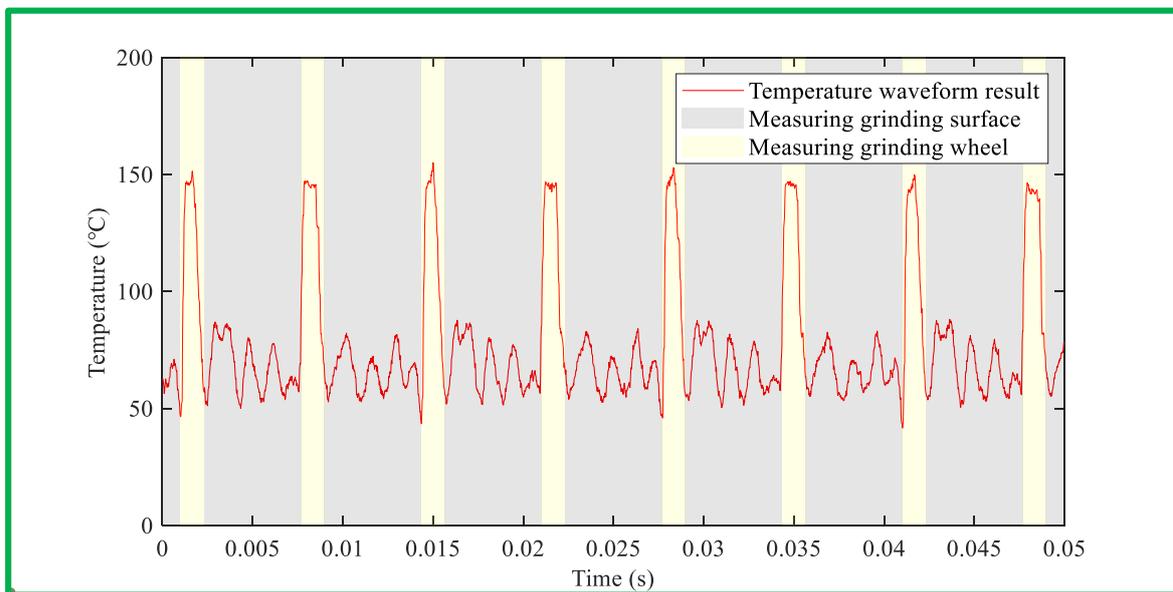
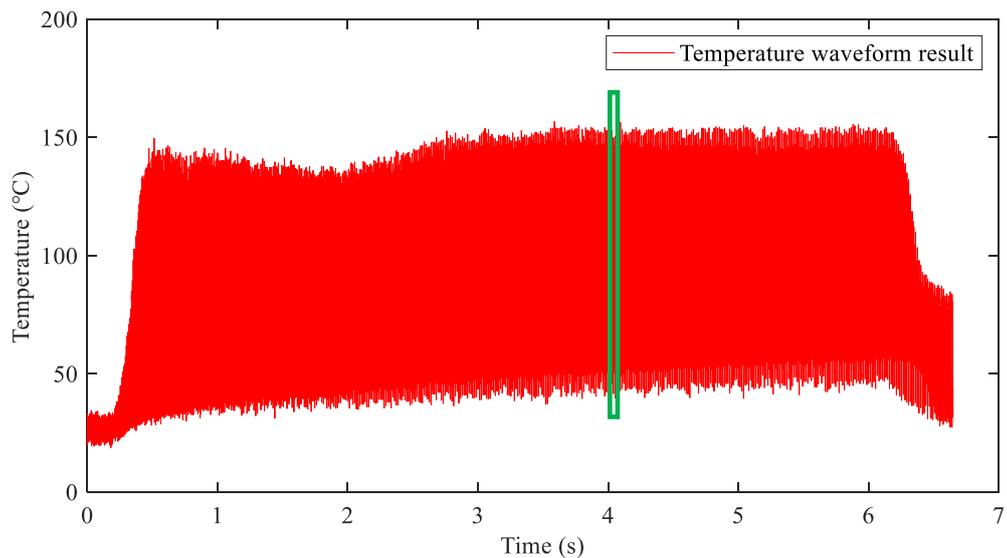
Grain		SV
Grain size		#80
Rotation speed	r/min	4500
Grinding speed	m/s	19.8
Feed rate	mm/min	1000
Depth of cut	mm	0.02, 0.2, 1.0
Grinding direction		Down cut
Grinding condition		No cold air
Emissivity of CFRP		0.952
Temperature measurement position		Finished surface side
Sampling rate	kHz	50

5.8.4 実験結果

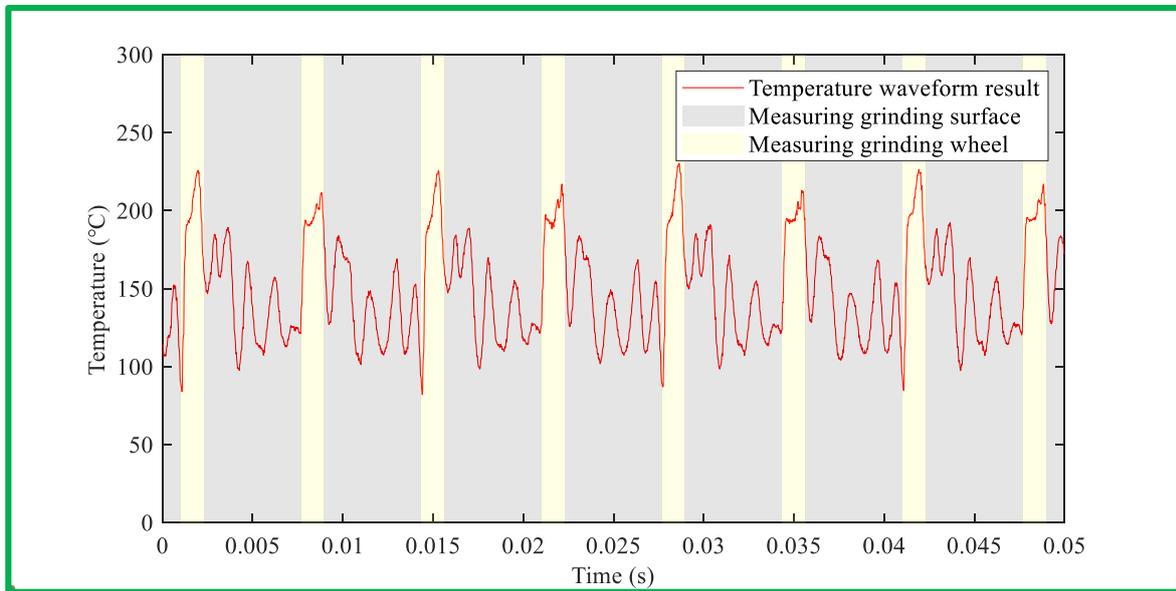
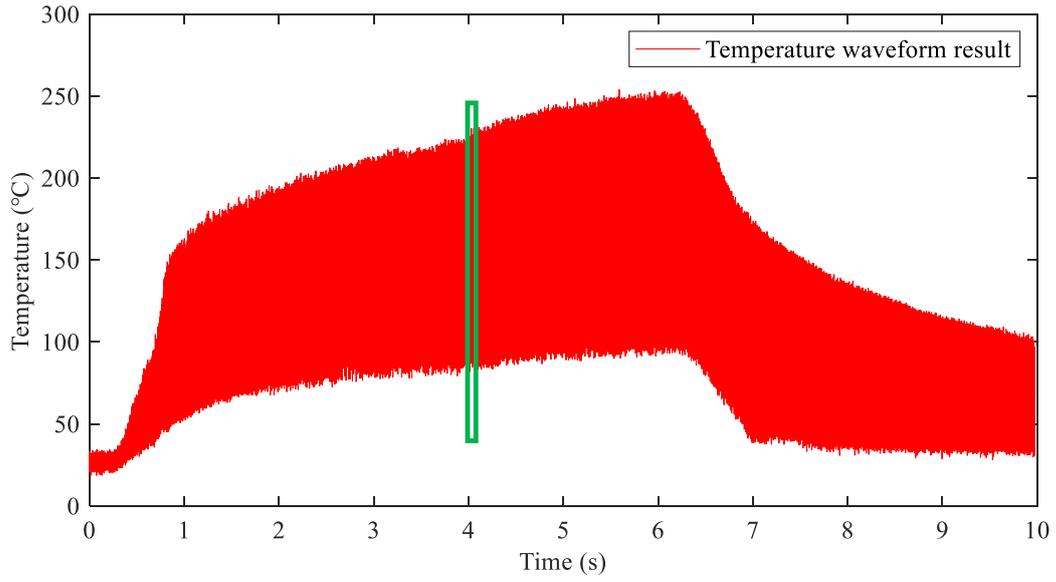
図 5.47 に温度測定結果, 図 5.48 に切込み深さ 1 mm で加工した後の砥石表面写真を示す. いずれの切込み深さにおいても, 砥石半回転毎に研削面の温度を計測できていることが分かる. また切込み深さ 1.0 mm においては, 時間と共に加工面と砥石表面の温度が上昇していく過程が見られた. これは図 5.48 に示した通り, CFRP の黒い切りくずが砥石表面に付着し, 目づまりが生じたことが原因であると考えられる. 以上の通り, 一般砥石であるビトリファイド砥石においても, 赤外線放射温度計を用いた温度計測手法によって加工面と砥石表面の温度の測定, ならびに目づまりによる温度の上昇を確認することができた.



(a) $t=0.02$ mm

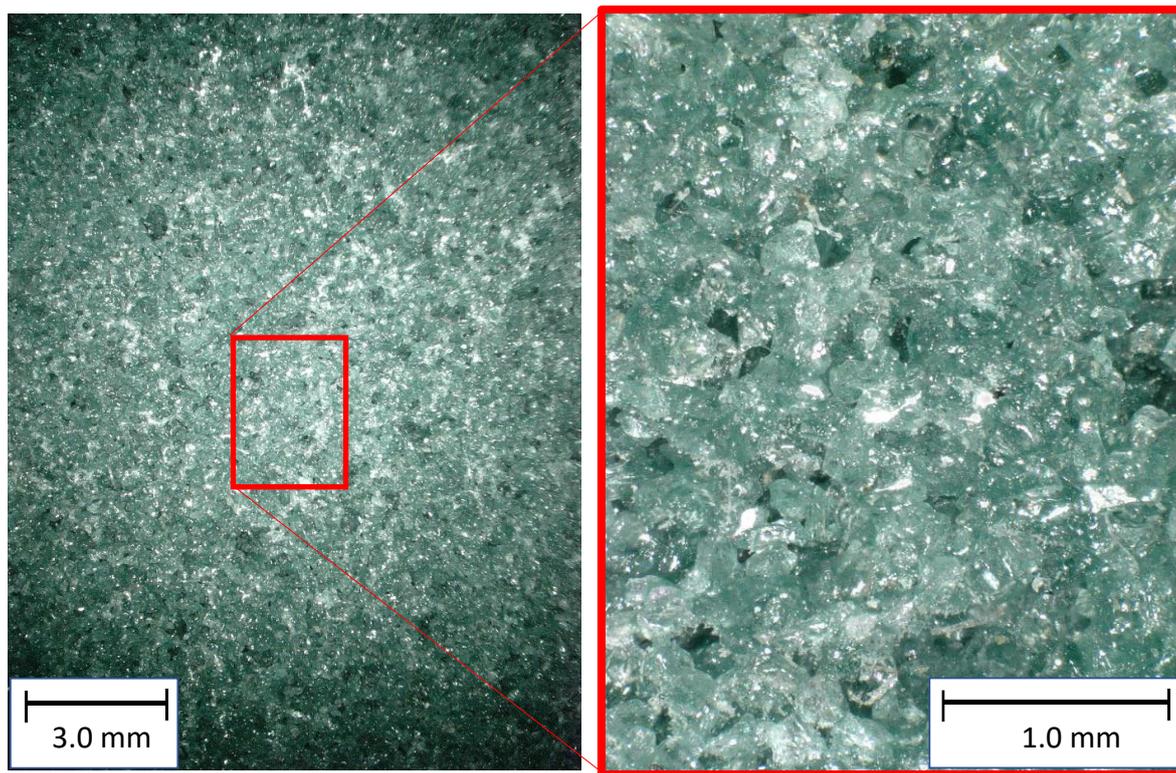


(b) $t=0.2 \text{ mm}$

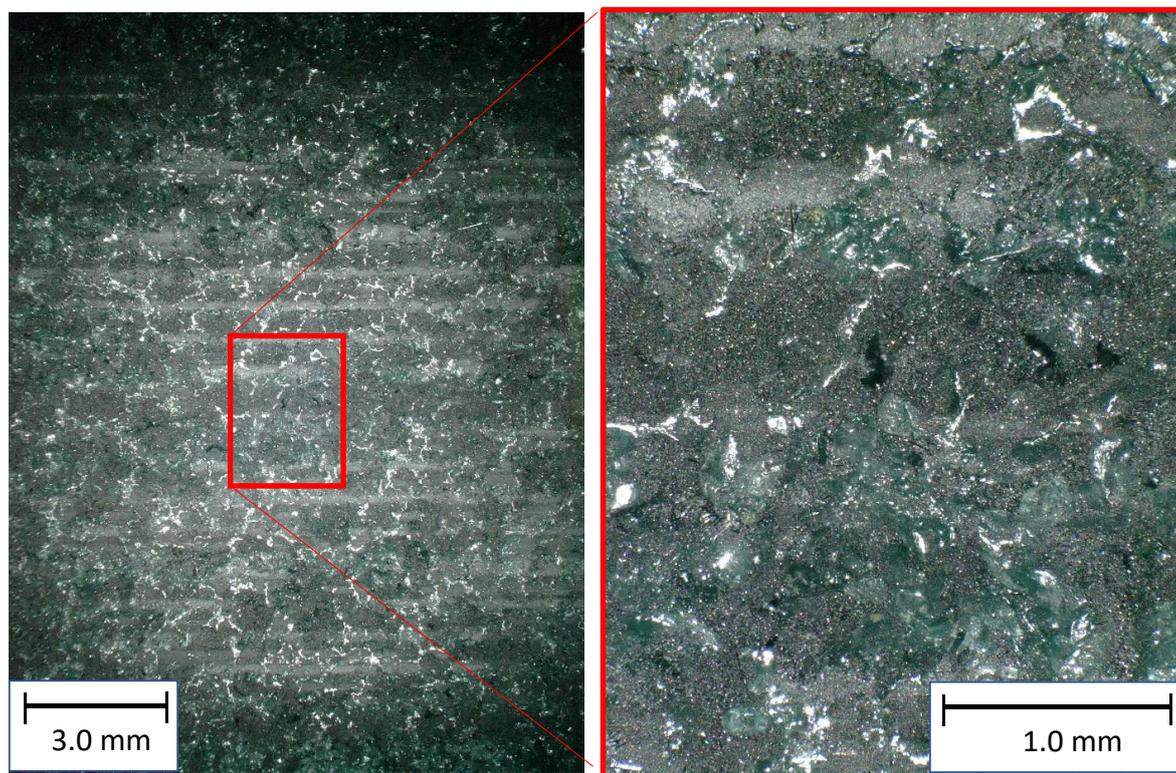


(c) $t=1.0\text{ mm}$

Fig. 5.47 Temperature result



(a) Before grinding



(b) After grinding

Fig. 5.48 Observation of grinding wheel surface

5.9 まとめ

本章では、CFRP のドライ研削加工に赤外線放射温度計を用いた温度計測手法を適用し、加工中の研削面温度の測定を行い、その効果の実証を行った。そして数値解析結果を基に赤外線放射温度計の測温部の位置と測定温度との関係性を調査した。また熱電対を用いた手法との比較を行い、赤外線放射温度計を用いた手法の温度測定結果の妥当性を検証した。そして、加工の異常の発生を検知に赤外線放射温度計を用いた手法が有効であることを検証し、最後に一般砥石であるビトリファイド砥石にも赤外線放射温度計を用いた温度計測手法が適用可能であることを検証した。その結果、以下のことが分かった。

- (1) CFRP のドライ研削加工時の赤外線放射温度計を用いた温度測定において、砥石の内側から冷風を供給することで切りくずが光路に侵入し、温度測定を阻害する影響を低減することができる。
- (2) CFRP のドライ研削加工に赤外線放射温度計を用いた温度計測手法を適用することで、精密削りから高能率研削を想定したいずれの切込み深さにおいても、周期的に研削面温度と砥石表面の温度を測定することが可能であった。
- (3) 数値解析結果より、切込み深さが 0.02 mm のように微小な場合、測温部位置が接触弧側と中央では、温度が室温である加工前の被削材表面を含めた温度が測定される。
- (4) 切込み深さによって接触弧長さが変化するため、赤外線放射温度計の測温部位置によって、測定温度は変化する。また測温部位置が仕上げ面側の場合、切込み深さが変化しても評価対象は変わらないため、公平な評価をすることができる。
- (5) 熱電対を用いた研削面の裏側の温度を測定する手法は、応答速度が十分でないことと研削面表層と溝先端の間の CFRP 内部で温度勾配が生じている影響で、真の研削面温度よりも低めに測定されるため、赤外線放射温度計を用いた温度計測手法の温度測定結果の妥当性の検証はできなかった。
- (6) 目づまりが生じる異常が発生した際、赤外線放射温度計を用いた温度計測手法では研削面と砥石表面温度ともに急激な温度上昇が見られた。また、その急激な温度上昇が起こる直前に、砥石表面温度測定時の波形に小さな山が発生しており、これは加工面に損傷が発生する程の目づまりが生じる予兆を検知する手段として有効であると考えられる。
- (7) 一般砥石であるビトリファイド砥石に赤外線放射温度計を用いた温度計測手法を適用した場合、電着砥石と同様に、研削面と砥石表面の温度を周期的に計測することができた。また、目づまりによる温度上昇も同様に温度測定結果から確認することができた。

第6章

結論

6.1 本論文のまとめ

本研究では、まず、CFRP をドライ研削することを目指し、研削液の代わりに冷風を供給する研削加工を提案した。外周に多数のスリットを設けた薄肉電着カップ砥石の内側から冷風を供給する手法を提案しその特性を調査した。次いで、加工後の CFRP の健全性を保ち加工の成否を判断するうえで重要な加工時の温度をインプロセスで計測できる手法として、赤外線放射温度計を用いた新たな研削面の温度測定手法を提案した。さらに、この提案手法が CFRP のドライ研削加工に適用可能であることを示すとともに、赤外線放射温度計の测温部位置と測定値の関係性を調査した。最後に加工の異常の検知が可能であることを検証した。本研究で得られた結果を以下に示す。

第2章「砥石内冷風研削による CFRP の加工面性状と加工特性への影響」では、スリットを有する薄肉電着カップ砥石を提案し、その内側から冷風を供給して CFRP の端面研削をした際の加工面性状と加工特性への影響を調査した。加工面性状については表面粗さと加工面の観察、加工特性については研削抵抗と加工面温度により評価した。切り込み深さが 0.02mm という小さい領域だけでなく、切込み 1.0 mm という研削加工では非常に大きな条件まで、全ての条件において砥石内冷風による温度低減効果が示された。External では行き届かない加工点にも Internal では内側から冷風が供給されることを示した。

砥石表面の洗浄効果については、切り込み深さが微小な 0.02 mm の場合には、砥石内冷風による砥石洗浄効果が示されたが、切り込み深さが大きくなるとその効果は薄れる傾向にあった。冷風の供給角度などのノズル設定条件の影響、スリット寸法や形状の影響があると推測される。

第3章「ノズルの設置条件が冷風の流れに及ぼす影響」では、第2章において実験的に明らかにできなかったスリットに対する冷風ノズルの角度などの設置条件に関する課題について解析的な検討を行った。ノズルの最適な角度を砥石の周速と冷風の流速の関係から近似的に求め、その結果を用いて流体解析を行い、最適な砥石内冷風供給方法について検討した。冷風は薄肉砥石のスリット出口から砥石法線方向に流れ出ており、砥石接線方向(砥石外周面)には流れていないことが示され、これは実験において切込みが大となると切りくず排出効果に限界があったことの要因の一つであると推察される。

第4章「赤外線放射温度計を用いた研削面の温度測定手法の提案」では、はじめに赤外

線放射温度計を用いた新しい研削面の温度測定手法の測定原理、従来の加工温度の測定手法に対する優位性について示した。そして黒体炉を用いて主軸回転速度に対する測定温度波形の応答性について調査した。

まず、測定対象、工具軸の垂直線上に小穴を設けた中空の砥石、赤外線放射温度計の順に配置することで、砥石の2つの小穴を通して加工面の温度を計測することが可能となった。提案する赤外線放射温度計を用いた手法は、熱電対を用いた手法やサーモカメラを用いた従来の手法に比べて、加工中、研削面の温度をインプロセスで測定可能な特長がある。300℃に均熱した黒体炉をターゲットとして提案手法を適用したところ、7000r/minの高速回転においても、5℃程度の誤差で温度計測が可能であった。

第5章「赤外線放射温度計を用いた研削面の温度測定手法によるCFRPの研削加工時の異常の検知への適用」では、CFRPのドライ研削加工に対し、赤外線放射温度計を用いた温度計測手法を適用した。

CFRPのドライ研削加工時の赤外線放射温度計を用いた測定において、砥石の内側から冷風を供給することで切りくずが光路に侵入し、温度測定を阻害する影響を低減することができることを示した。これにより、精密削りから高能率研削を想定したいずれの切込み深さにおいても、周期的に研削面温度と砥石表面の温度を測定できることを示した。

測定される温度はΦ8mmの測温領域の平均値であり空間分解能は必ずしも高くないことに関して、数値解析結果を基に赤外線放射温度計の測温部の位置と測定温度との関係性を調査した。測温部位置が接触弧側もしくは中央では、室温である加工前の被削材表面を含めた温度が測定される。

CFRP研削時のインプロセス計測を行い、目づまりが生じる異常が発生した際、研削面と砥石表面温度ともに急激な温度上昇が見られた。また、その急激な温度上昇が発生する直前に、砥石表面温度測定時の波形に小さな変動が発生しており、これは加工面に損傷が発生する程の目づまりが生じる予兆であると考えられ、事前にトラブルを回避することに適用できる可能性がある。

6.2 今後の課題と展望

本研究では、金属薄肉カップ砥石の効用と発明以来200年以上経過したゼーバック熱電対に代わるデジタルチックで進化と市場急拡大が著しい自動車の自動運転には欠かせない温度センサーの赤外線放射温度計を用いた新しい研削面の測定法を提案し、加工物と砥石の間の外からは見えない研削面の温度をオンマシン・リアルタイム・インプロセス計測が可能なることを明らかにした。

一方で研削面における最高温度を計測できない。研削面においてピークとなる温度の領域は局所的で赤外線放射温度計はφ8の測温部領域の平均温度を出力するため最高温度よりも低い温度が出力される。測温部のサイズを小さくすれば、最高温度に近い温度を測定可能になると考えられる旨の主張があるが、そもそもΦ84mm砥石が7000rpmで1000mm/min

移動する外周研削面の $\Phi 10$ mm穴の $\Phi 8$ mm入力エネルギーの0.00001秒刻みに局所的な温度ムラは（今回も普通は）存在しないと考えている．入力する赤外線（温度エネルギー）は凸レンズで数ミリの熱電変換素子（サーモパイル）の感熱部で電気変換され出力する電圧と温度の関係をユーザーが任意に変換する設定の問題である．

また、研削液を使用するようなウェットな環境での温度測定に適用できない主張もあるが、多くのマシニングセンタ仕様にあるセンタースルーで水溶性クーラントの湿式砥石内研削液供給機構加工を行い、同時に工具交換時のドロワーボルトセンタースルー穴のブロー用のエアー又は着座ギャップエアーセンサーのエアーを使うことで、乾式の加圧エアーによるセンサー光路のコンタミパージがNC指令による切換え又は併用が安易安価で確実に可能と考えている．

空缶砥石に内蔵が可能で価格とサイズは1/2、機能は2倍の赤外線センサーの開発に期待したい．

図6.1に示すハイスピードカメラ、レーザー変位計のサイズは、手の平サイズもあるが、砥石の内蔵は未だ難しいので小型化に期待したい．

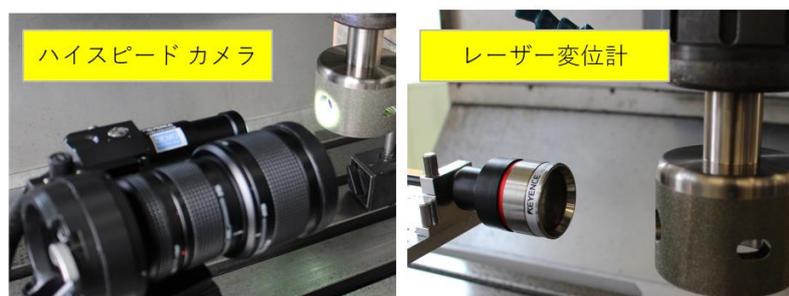


Fig.6.1 Current high-speed cameras and laser displacement meters

ゼーベックの熱電対は研究テーマではないが、センサー計測温度の比較として用いた中にアルメル・クロメル線を砥石に直接接触させ計測する主張があったので、簡易的にアルメルクロメル線を手で持って安全のため砥石に触れる程度の押し付け力で図6.2のとおり砥石に接触した結果160°Cを検出した．砥石と接触する方法は検出温度がアルメルクロメルの温度なのかCFRP加工面温度か或いは砥粒温度かが特定できないので使用を避けたが、今後の究明に期待したい．

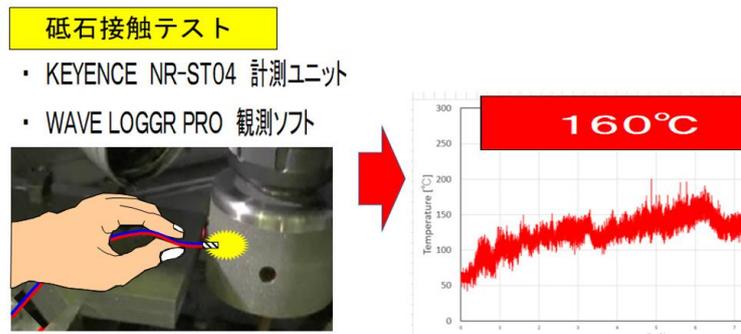


Fig.6.2 Thermocouple grindstone contact test

図 6.3, 6-4 で示すスマートツールは、ゴールとして最初から構想に入れた研究を同時並行で進めてきた。「農工大発ベンチャー」が世に出し大いに社会貢献できることを祈りたい。

- ・ 対象 ・ 環状切削(サイドカッター、フェイスミル…), 研削(ビトリファイド、超砥粒電着…), 研磨(ゴム、樹脂、パフ…) 工具
- ・ 新規性 ・ 工具回転軸に直交する窓(加工面の情報が得られる貫通穴) があって強度保障が得られる環状回転工具
- ・ 計測 ・ 放射温度計 ①
赤外線で加工面(点)の温度を計測する
- ・ レーザー変位計 ②
加工面の高低差で粗さ計測し且つ外径の真円度を計測する。
- ・ ハイスピード・マイクロカメラ ③
加工面撮像を、濃淡、模様、光沢、ツールマークで抽出し正常値と比較し粗さ推定、官能・見た目の測定アルゴリズム。

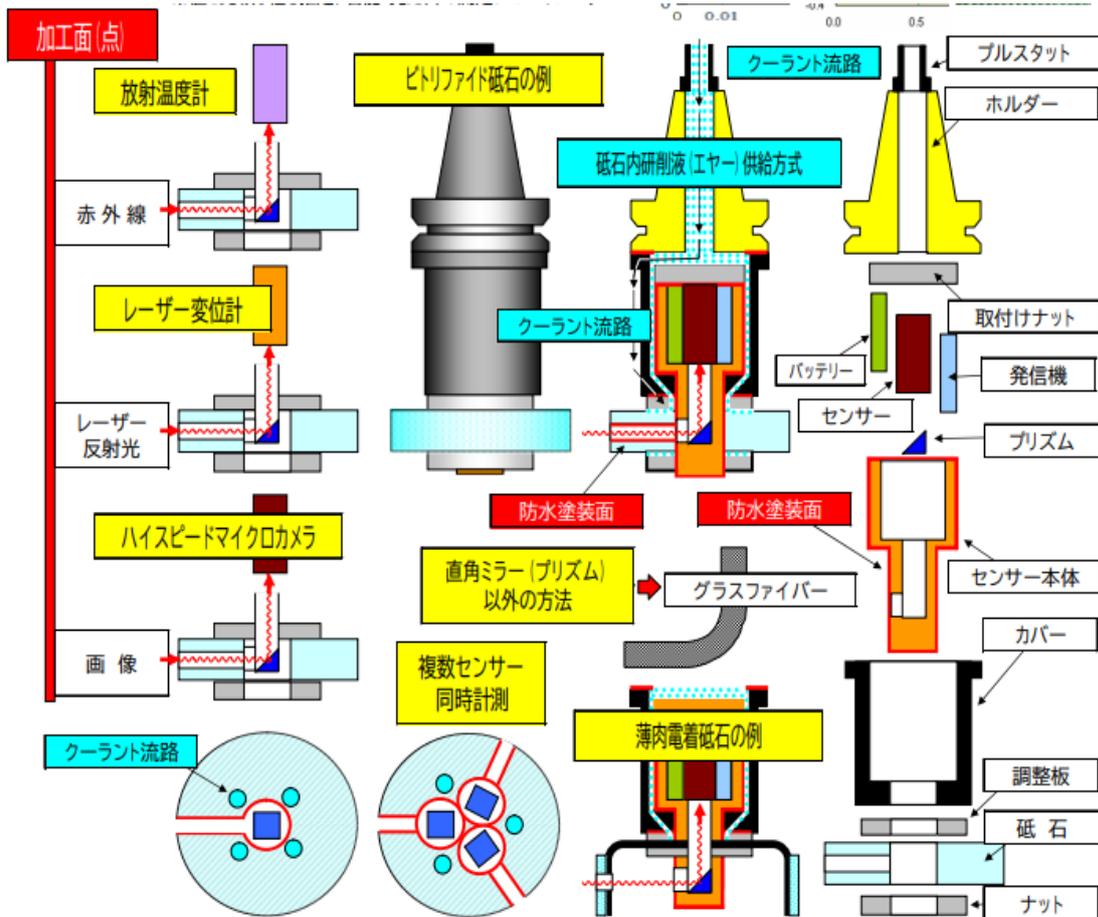
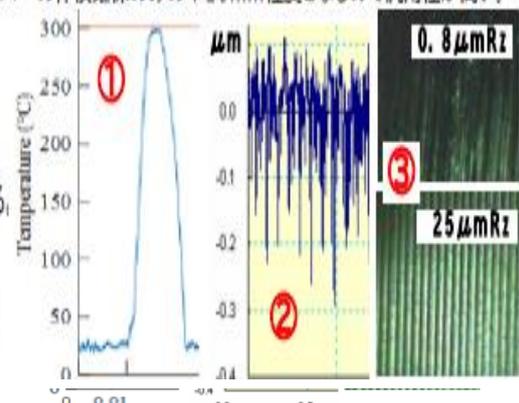


Fig.6.3 New release of smart holder with built-in various sensors
A smart holder that allows you to see what you cannot see !

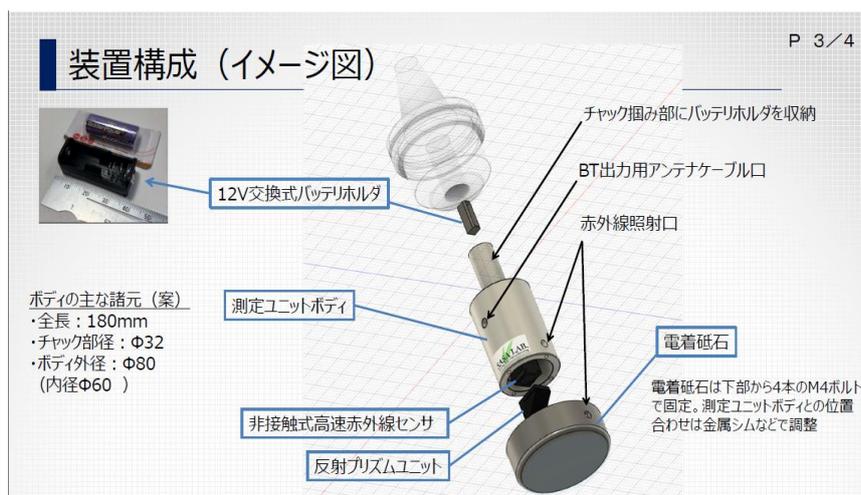


Fig.6.4 Smart holder configuration

第1章の図1.26で示した粗さゲージを撮影した図6.5に示す画像と粗さ基準 (ゲージ) との相互関係情報は、入力画像の粗さコンピューター判定システムのデシジョンテーブルとして用いると容易に高精度な粗さパターンマッチングの自動化ができると考えている。

又、官能検査の例えば、カッターマークの有無、光沢、傷、曇り、模様、模様で粗さを判定する等をNCプログラムが高速で処理し加工の最適化と人の目に頼る曖昧さが機上で判定できると考えている。

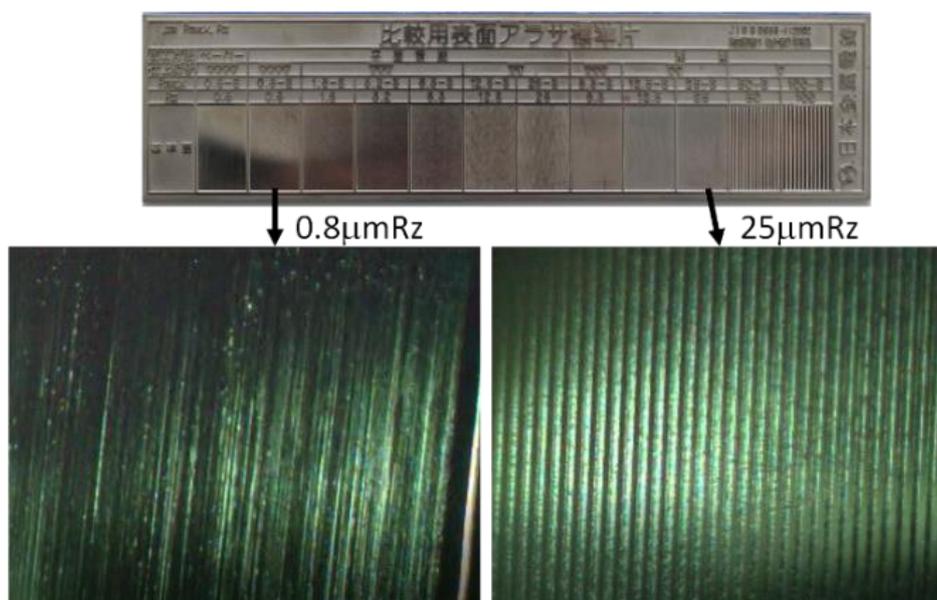


Fig.6.5 Image standard for roughness judgment

また、第5章の図5.11で示した砥石表面の変化と放射率の図6.6で示す相関関係の情報は、刻々と変化する砥石表面の放射率換算基準として、コンピューター自動判定システムのデシジョンテーブルとして使用すれば容易に高精度な自動化ができると考えている。

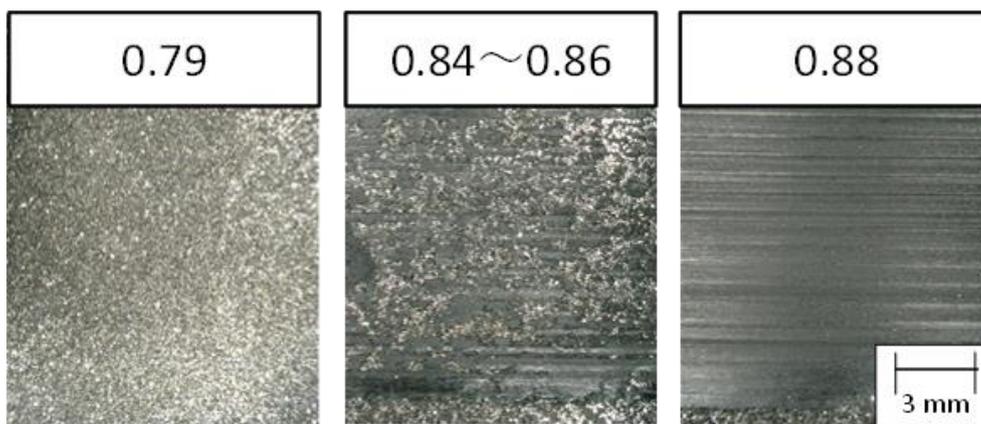


Fig.6.6 Emissivity criteria for grindstones

これは、蓄積した基準の数により判定精度が比例向上し、図 6.4 の加工面画像の判定とシナジー効果により更にコンピューター高速処理技術と相まって誰もが利用可能な共通のシステム価値となるので、フォーマットを定め情報を集約しデシジョンテーブルとして整え公開して社会貢献する DX な仕組み作りに取り組みたい。

参考文献

- (1) 特許行政年次報告書 2021 年版 (本編), Vol.1, No.1, (2021), pp2-6.
- (2) 我が国の産業技術に関する研究開発活動の動向,(2021) pp4.
- (3) 経済産業省・経済産業政策局・商務情報政策局, 事務局説明資料 (デジタル社会の現実について) , pp14-19.
- (4) T.Roberts, Rapid growth forecast for carbon fibre market (2007).
- (5) 前島豊, 炭素繊維の最先端技術 (2013), 株式会社シーエムシー出版.
- (6) Holmes, M., Carbon fibre reinforced plastics market continues growth path (2013).
- (7) 久野正雄, ボーイング 787 型機の低騒音技術と低燃費技術, 航空環境研究. (2012) pp47-52.
- (8) 矢野経済研究所, 車載用 CFRP の世界需要予測調査を実施 (2016).
- (9) 平成 24 年度中小企業支援, 調査, 炭素繊維複合材料の加工技術に関する実態調査, 経済産業省. (2013).
- (10) 日刊工業新聞(2022/2/27), pp12.
- (11) 株式会社シーエム, CFRP の基本の特性 (特性と設計), (2013).
- (12) 東レテナックス株式会社, 技術資料,(2000).
- (13) 有澤秀彰,赤間知, 二井谷春彦, 炭素繊維複合材 (CFRP) の高能率加工技術, 三菱重工技報, Vol.49, No.3 (2012).
- (14) 金枝敏明, 高橋正行, CFRP(炭素繊維強化プラスチック)の切削機構に関する研究(第 1 報)—極低速下における加工面生成機構—, 精密工学会誌, Vol.55, (1989), pp.1456-61.
- (15) 鈴木節男, 難削材の切削・研削・ドリル加工-現場に活かす実践技術 (1990), 海文堂.
- (16) 花崎伸作野村昌考, FEM による CFRP の切削機構の解析 (食い付き時の繊維破壊挙動) , 日本機械学会論文集 C 編, Vol.61, (1995), pp.1163-8.
- (17) 狩野勝吉, 難削材・新素材の切削加工ハンドブック (2002), 工業調査会.
- (18) 花崎伸作, 藤原順介, 河合徹, 野村昌考 宮本猛, CFRP 切削における工具摩耗機構II, 日本機械学会論文集(C 編), Vol.71, (2005), pp.719-24.
- (19) 臼井 英治, 切削・研削加工学 下, 共立出版株式会社, (1971)
- (20) 精密工学会, 研削工学, オーム社, (1987)
- (21) 一般社団法人日本機械学会, JSME テキストシリーズ 加工学I—除去加工—, (2006), 一般社団法人日本機械学会, pp.41-42
- (22) 奥山繁樹 若手技術者のための研削工学 (第 6 回)研削温度の解析と測定, 砥粒加工学誌, Vol.59, No.7, (2015), pp415-418
- (23) R.L. Kegg , Industrial Problems I Grinding, Annals of the CIRP, Vol.32, No.2 (1983), pp559
- (24) 稲崎一郎, 研削加工のスキルフリー化をめざして—研削プロセスの最新計測制御技術—, 精密工学会誌, Vol. 75, No. 7, (2009), pp813-816
- (25) (株)ニートレックス, <https://www.nitolex.co.jp/>

- (26) S.L. Sein, I.S. Shyha, T. Barnett, D.K. Aspinwall, W.M. Sim, Grinding performance and workpiece integrity when super abrasive edge routing carbon fibre reinforced plastic (CFRP) composites, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 61 (2012) pp295–298.
- (27) J. Sheikh-Ahmad, J. Mohammed, Optimization of Process Parameters in Diamond Abrasive Machining of Carbon Fiber-Reinforced Epoxy, *Mater. Manuf. Process.* 29 (2014) 1361–1366.
- (28) 大橋一仁, 前野隼人, 藤原良平, 窪田真一郎, 吉川満雄塚本真也, CFRP の研削特性に及ぼす加工雰囲気の影響 (水溶性クーラントおよび液体窒素供給の効果), *日本機械学会論文集(C編)*, Vol.79, (2013), pp.5068–78.
- (29) 大森 茂俊, 坂本 治久, 清水 伸二, 小形冷風供給装置の平面研削加工への適用性, *精密工学会学術講演会講演論文集*, (2005), pp733-34
- (30) 大森 茂俊, 坂本 治久, 清水 伸二, 準冷風研削加工における砥石磨耗低減作用とその活用, *精密工学会学術講演会講演論文集*, (2006), pp317-18
- (31) 八尾 泰弘, 不破 洋平, 笹原 弘之, 砥石内研削液供給機構による難削材形状研削加工に関する研究, *日本機械学会論文集 (C編)*, Vol.77, No.781 (2011), pp.319–28.
- (32) 小尾 誠, 辰巳 洋二, 佐田 登志夫, 研削加工における砥石目づまりのインプロセス測定, *精密機械*, Vol.39, No.465, (1973), pp1062-1067
- (33) 須藤 徹也, 和井田 徹, 佐田 登志夫, 研削加工における砥石作業面のインプロセス測定, *精密機械* Vol.36, No.429, (1970), pp676-682
- (34) 坂本 治久, 清水 伸二, 砥石作業面トポグラフィのオンマシン測定システムの試作とその評価, *砥粒工学会誌* Vol.43, No.4, (1999), pp172
- (35) S.Shimizu and H.Sakamoto, On-machine Monitoring of the Wheel Working-surface Condition with the Relative Frequency Distribution of its Profile, *Key Engineering Materials*, Vol.196, (2001), pp111
- (36) 坂本 治久, 清水 伸二, 加藤大二郎, 砥石作業面トポグラフィに基づく目づまり挙動の評価, *精密工学会誌*, Vol.64, No.9, (1998)
- (37) 坂本 治久, 清水 伸二, 研削進行に伴う砥石作業面状態変化の評価法: 作業面状態変化が複合して生じる場合の評価法, *精密工学会誌論文集* Vol.71, No.1, (2005), pp120-125
- (38) 大森 茂俊, 横川 宗彦, 小久保 邦雄, 研削温度の測定法に関する研究 (OS12 研削・砥粒加工), *生産加工・工作機械部門講演会: 生産と加工に関する学術講演会*, (2001), pp277-278
- (39) A.D. Batako, W.B. Rowe, M.N. Morgan, Temperature measurement in high efficiency deep grinding, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.45, (2005), pp1231-1245
- (40) A. Lefebvre, P. Vieville, P. Lipinski, C. Lescalier, Numerical analysis of grinding temperature measurement by the foil/workpiece thermocouple method, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.46, (2006) pp1716–1726
- (41) A. Lefebvre, F. Lanzetta, P. Lipinski, A.A. Torrance, Measurement of grinding temperatures using a foil/workpiece thermocouple, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*,

Vol.58 (2012), pp1–10

(42) Dehao Liu, Gang Wang, Zhenguo Nie, Yiming (Kevin) Rong, An in-situ infrared temperature-measurement method with back focusing on surface for creep-feed grinding, *Measurement* Vol.94, (2016), pp645-652

(43) 上田隆司, 細川晃, 山本明, 光ファイバを用いた赤外線輻射温度測定法—研削温度測定への適用—, *精密機械*, Vol. 48, No. 5, 1982, pp629–634

(44) T. Ueda and T. Sugital, Thermal Behaviour of Cutting Grain in Grinding, Vol. 44, No.1, (1995), pp325–328

(45) E. Brinksmeier, C. Heinzl, L. Meyer, Development and application of a wheel based process monitoring system in grinding, *Annals of the CIRP*, Vol.54, No.1, (2005), pp301-304.

(46) Y. Fukuhara, S. Suzuki, and H. Sasahara, Real-time grinding state discrimination strategy by use of monitor-embedded grinding wheels, *Precision Engineering.*, Vol.51, (2018),pp128–136

(47) 柳下福蔵, CFRP の切削加工—穴あけ加工を中心に—, *精密工学会誌*. Vol 82 (2016) pp340-345

(48) 奥山繁樹, 若手技術者のための研削工学 (第 2回) 研削砥石の特性と使用法, 砥粒加工学会誌, Vol.59, No.3 (2015), pp.148–51.

(49) 八尾 泰弘, 不破 洋平, 笹原 弘之, 砥石内研削液供給機構による難削材形状研削加工に関する研究, *日本機械学会論文集 (C 編)*, Vol.77, No.781 (2011), pp.319–28.

(50) 塚本真也, 大橋一仁 藤原貴典, 研削加工の計測技術 (2005), 養賢堂.

(51) 日本機械学会, 熱計測技術 (1986), 朝倉書店.

(52) 計量管理協会, 温度の計測 (1988), コロナ社.

(53) K.Takazawa, Theory and measuring method of the temperature distribution in ground surface layer, *精密機械*, 30 卷 1 号, (1964), pp851-856

(54) Hiroyuki Kodama, Shingo Okazaki, Yifan Jiang, Hiroyuki Yoden, Kazuhito Ohashi, Thermal influence on surface layer of carbon fiber reinforced plastic(CFRP) in grinding, *Precision Engineering*, Volume 65, (2020), pp53-63

(55) 長谷川嘉雄, 奥山繁樹, 今井正彦, 研削熱の工作物への流入割合, *精密機械*, 47 卷, 10 号, (1981), pp39-44

(56) 塚本真也, 大橋一仁, 藤原貴典, 研削加工の計測技術 (2005), 養賢堂.

謝辞

笹原先生には、多くのご教授と導きを頂き有難う御座いました。
72歳入学の高齢者が相手なので、随分と気を使わせ申し訳ありませんでした。
学位審査、他では夏先生、安藤先生、小笠原先生、中本先生にお世話になりました。
有難うございました。

共同研究の喜多さん、感謝の気持ちは察してくれていると思いますが改めて有難うございました。社長になった時には工場見学に押しかけるので美味しい昼飯をお願いします。

ジャパンセンサー(株)の本田さん山下さん、惜しみない技術支援を有難うございました。

(株)キーエンスの加藤さん神田さん橋本さん、惜しみない技術支援を有難うございました。

(株)ニートレックス副社長の武田さんから多くのご指導を頂きました。武田さんが居たから全てが成り立っている倶楽部の大々恩人であり深謝しています。有難うございました。

三菱重工業(株)の元部長斎藤さんから爽やかな人格を学びました。有難うございました。

全ては、OB 博士・平和産業(株)社長で恩人の八尾さんと大学を訪問したのが始まりです。以来ハイパー倶楽部を作り 6名の博士が誕生し、今回はリリースで7人目を引き受け8人目は(株)茨城製砥専務の野村さんにバトンを渡しました。責任は果たしたので今後は沖縄に移住し未達の研究継続と作家業でもしながら暮らします。有難うございました。

(株)名光精機の松原会長さんには、40年来のご厚誼ご指導を頂き感謝いたします。
ご長男で OB 博士の社長光作さん、多くの研究費・賞金・ご助言を有難うございました。

三菱重工業(株)の主任で息子と同年の OB 博士福原さんには、共同研究者として長く多くのご指導を頂きました。自費で大学に残りハイパー倶楽部の後進指導は現職も兼ね大変でしょうが宜しくお願いします。有難うございました。(ご結婚おめでとう御座いました)

ノムラマシン(株)社長の野村さん、研究費の応援と多くのご指導を有難うございました。

浜松の鈴木さん、ご指導で特許他を 72 件余り申請できました。有難う御座いました。
司法書士の山城さん、兄弟付き合いで励ましてもらいました。有難う御座いました。

最後になりましたが、笹原研究室と中本研究室の皆さまご支援を有難う御座いました。

世界一優しく料理上手で美人の女房殿に、深い愛情に感謝感謝です。必ず絶対に長生きして先に死なないことと、生まれ変わっても是非又夫婦をお願いします。
福岡にいる親孝行の長男夫婦に感謝します。

2022/09/30 伊藤幸男 74歳 拝