（ 様式D－２ ）
（ 別　　紙 ）

令和６年度　海外派遣研究員研究報告書

令和　７年　５月２５日

日本大学理事長　　殿
日本大学学長　　殿

所　　属　　理工　　学部（理工学研究所）
資格・氏名　　助教・内田　元

■本報告書の内容を公表することは，了承しております。
□本報告書の内容を公表することは，差し控えください。

令和６年度海外派遣研究員（長期）の研究実績を，下記のとおり報告いたします。

記

１　区　　分　　長期

２　研究課題

単粒研削における材料除去モデルを適用した研削シミュレーションに関する研究

３　派遣期間　　西暦２０２４年　５月１３日　～　２０２５年　３月１５日

４　派　遣　先　　英国，スロベニア

５　研究目的

研削加工とは，砥粒・結合剤・気孔の 3 要素から構成される砥石を工具として用いる除去加工の一種である．砥石表層に突出した無数の砥粒がそれぞれ切れ刃の役割を果たし，砥粒 1 粒 1 粒が高速微小切削を繰り返すことで工作物を除去していく加工法である．研削加工は，高い寸法精度と良好な研削仕上げ面粗さ，加工変質層の少ない高品位な仕上げ面を実現できることから，各種製品の仕上げ加工に広く用いられている．しかし，一般的に砥粒 1 粒が工作物に切り込まれる量は非常に小さく，かつ剛性の低い砥石を工具として用いているため，「砥粒や工作物の弾塑性挙動」，「砥粒切れ刃の脱落及びへき開」，「材料のチッピング現象」，「研削熱による熱変形」など，さまざまな要因が研削仕上げ面の創成に大きな影響を及ぼしてしまう．すなわち，砥粒 1 粒によって創成される研削痕の集合体である研削仕上げ面を高精度に予測するためには，これらの要因を考慮して，砥粒 1 粒による研削痕を正確に再現できるかが課題となっている．そこで本研究では，単粒研削における材料除去メカニズムを解析することで，砥粒 1 粒が材料を除去する各種要因をシミュレーションにより正確に再現することを目的としている．

派遣先の英国の大学(Liverpool John Moores University)では，単粒研削における各種材料除去メカニズムのうち，「工作物の塑性挙動」に着目し，その現象を解明するため研究を行った．単粒研削では，図 1 のようにラビング・プローイング・カッ

ティングと呼ばれる 3 つの形態がある．砥粒 1 粒の切込量が非常に小さい領域では，砥粒が工作物表面をこすり弾性変形のみが生じるラビング領域となり，切込量が増加するにつれて，工作物表面を引っかくことで弾性変形と塑性変形が生じ，工作物を掘り起こすプローイング領域，塑性流動が生じ切削加工と同様に切りくずを排出するカッティング領域に偏移することが知られている．ここで，弾性挙動の要因は砥粒の弾性変位と工作物の弾性回復であり，これらは過去の研究より算出可能である．一方，プローイング領域で生じる工作物の掘り起こし現象(塑性変形)に関しては，どの程度の掘り起こしが生じるのか，またカッティング領域との偏移点がどこなのかが明らかになっていないのが現状である．英国で実施した研究では，この工作物の掘り起こし現象を実際の単粒研削実験と有限要素法解析の両方から解明することを目的としている．

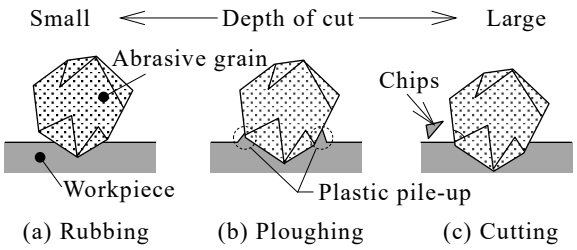


Fig.1 Mechanism of material removal by a single abrasive grain

またスロベニアでは，ISAAT2024 という国際学会に参加し，「Effect of Different Dresser Tip Shape and Dressing Conditions on Grinding Characteristics and Grinding Wheel Wear（ドレッサ先端形状とドレッシング条件の違いが研削特性と砥石摩耗に及ぼす影響)」の発表を行うとともに，研削加工の最新動向の調査を実施した．

6　研 究 概 要

①研究の方法

単粒研削における工作物の掘り起こし現象を明らかにするため，単粒研削実験と有限要素法解析ソフトウェア ABAQUS を用いた解析の両方を行った．

単粒研削実験では，実際に砥粒 1 粒を取り付けた専用工具を作成し，マシニングセンタを用いて工作物に対してスクラッチング試験を実施した．その際，発生した研削抵抗を工作物に取り付けた三成分動力計で，砥粒と工作物の接触検知を同じく工作物に取り付けた AE センサで測定した．また，試験後のスクラッチング溝を白色干渉顕微鏡で測定し，スクラッチング溝の形状と掘り起こし量を算出した．なお，工具の切込量と周速度を任意に変化させ，複数の条件でスクラッチング試験を実施した．

ABAQUS を用いた解析では，実際の単粒研削の砥粒と工作物の挙動をモデリングし，単粒研削実験を有限要素法解析で再現できるか検討を行った．なお，工作物の掘り起こし現象を解析するためには，材料の塑性挙動と破壊挙動を再現することが必要不可欠になる．そこで本解析では，Johnson-Cook 塑性モデルと Johnson-Cook 破壊モデルを用いた解析モデルの構築を行った．

②渡航先での活動内容

単粒研削実験では，まずダイヤモンド砥粒を工具となる金属片に取り付ける作業を行った．また，取り付けた砥粒の形状をマイクロスコープ及びレーザ変位計で測定した．スクラッチング試験では，作成した工具を用いて技術スタッフと連携しながら試験を実施し，研削抵抗と AE 波の測定と解析，試験後のスクラッチング溝の測定と評価を行った．

ABAQUS を用いた解析では，Johnson-Cook の各モデルを構築するため材料の引張試験を行い，それぞれ必要なパラメータを算出することが求められる．そこで，先行研究の試験方法を調査し，パラメータ算出に必要な引張試験条件の決定と試験片形状の検討を行った．そして，技術スタッフと連携しながら引張試験を実施し，取得した材料の応力とひずみの測定結果から，Johnson-Cook の各パラメータを取得した．さらに，構築した Johnson-Cook 塑性モデルと Johnson-Cook 破壊モデルに，単粒研削実験で測定した砥粒形状をモデルに適用し，有限要素法解析を実施した．

また，スロベニアでの研究発表では，英国で実施した研究の前段階に位置づけられ，砥石表層の各砥粒の分布や形状が研削特性に及ぼす影響を明らかにした．この研究より，砥粒 1 粒の形態解明の重要性を明らかにした．

7　研究結果・成果

単粒研削実験では，スクラッチング溝形状を測定した結果から，スクラッチング溝の断面積と掘り起こしの断面積をそれぞれ算出した．ここで，図 2 に示すように工作物の掘り起こしは切りくずとして排出されなかった部材が，砥粒切れ刃の両側面に押し出されるようにして生成される．ここで，掘り起こされた部材の断面積 A_r は，図中の両側面に押し出された断面積 A_{r1} と A_{r2} の和と定義できる．本研究では，スクラッチング溝の断面積 A' と掘り起こしの断面積 A_r の比を比掘り起こし量として定義した．この比掘り起こし量を図 3 に示すスクラッチング試験後の工作物表面を測定した結果から算出して評価した．

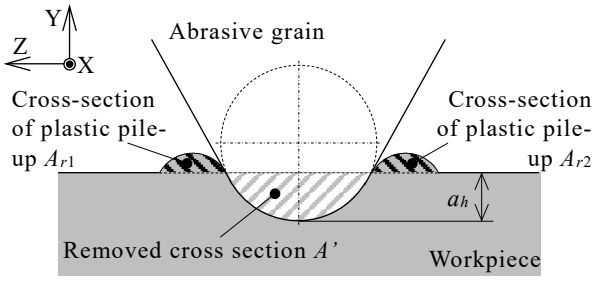


Fig.2 Schematic of workpiece plastic pile-up by ploughing

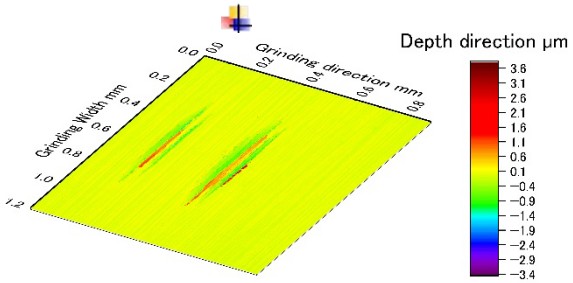


Fig.3 Example of measurement results of scratching test

その結果，切込量が小さい領域では比掘り起こし量は非常に大きくなり，切込量が約 1μm を超えたあたりで比掘り起こし量は小さくなった．また，測定した研削抵抗から垂直方向の力を示す法線抵抗と送り方向の力を示す接線抵抗の比を研削二分力比と定義した．その結果，同じく切込量が小さい領域では研削二分力比は大きく安定し

た加工が行えていないのに対して，切込量が約 1μm 付近で研削二分力比は小さくなった．以上の結果より，切込量が 1μm 付近にプローイング領域とカッティング領域の遷移点があることが実験により明らかになった．

また，砥粒の両サイドで掘り起こし量に違いがみられた．これは砥粒と工作物の接触角の違いが影響しているものだと考えられる．本実験では 1 つの砥粒でしか実験を行うことができなかったが，異なる砥粒で同様の実験を行うことで，接触角の違いが工作物の掘り起こしに及ぼす影響を明らかにできると考えられる．

ABAQUS を用いた解析では，まず引張試験の結果から Johnson-Cook の各パラメータを算出したものの，他の文献にある数値と大きく異なる結果になってしまった．原因として実験の試行回数が少なかったことが考えられる．以上より，本解析では他の論文のパラメータの値を用いてシミュレーションを実施した．図 4 にシミュレーション条件の詳細を示す．工作物表面から高さ方向に 0.1μm 離したところをシミュレーション開始位置とした．同じくシミュレーション終了点も加工終了してから高さ方向に 0.1μm 離したところとした．また，3 つのステップである 1st step(切込み量増加)，2nd step(切込み量一定)，3rd step(切込み量減少)はそれぞれ加工エリアが等間隔になるようにし，実際の単一砥粒の砥粒軌跡を再現した．

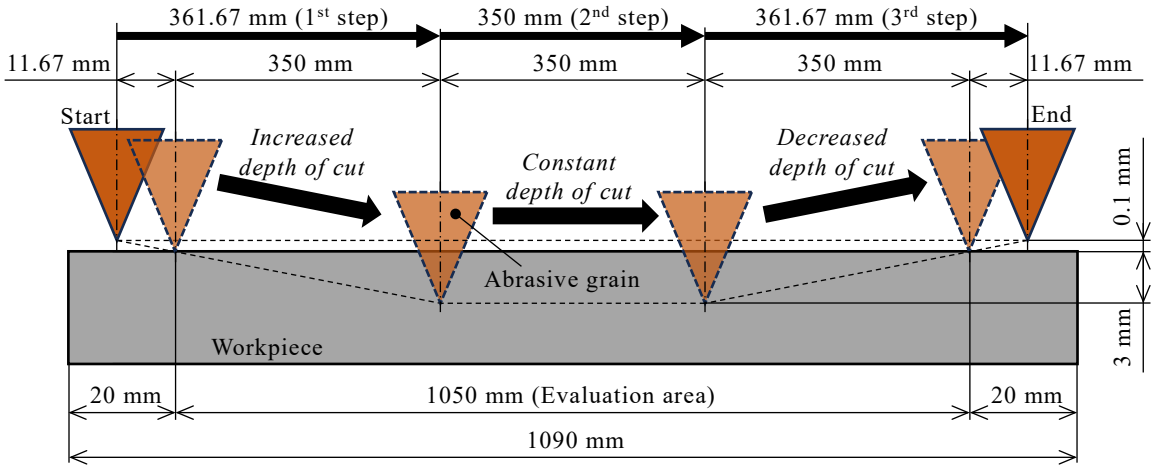
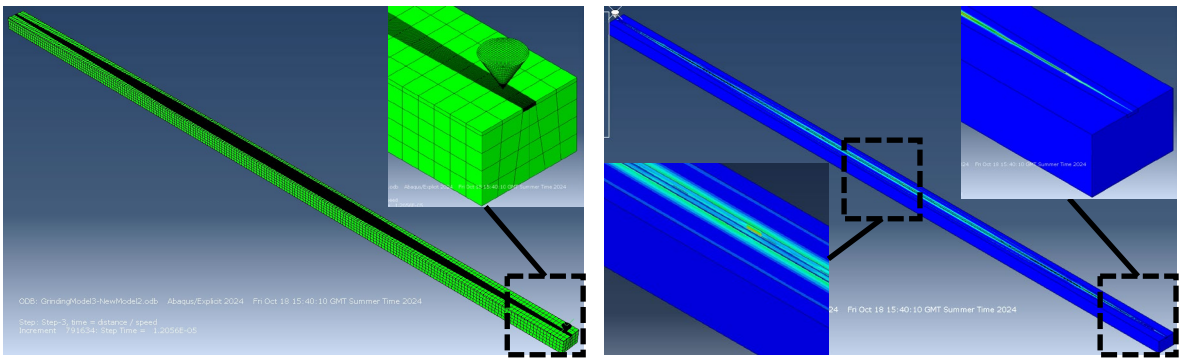


Fig. 4 Schematic of the new simulation condition



(a) Improved analytical model　(b) Simulation result with new model geometry

Fig. 5 Simulation model and simulation result

図 5 に実際に構築したシミュレーションモデルとその解析結果を示す.その結果，工作物の掘り起こしと研削抵抗をシミュレーションにより解析することができた．しかし，単粒研削実験と比較して工作物の掘り起こしと研削抵抗は完全には一致しなかった．原因として，Johnson-Cook の各パラメータを算出できなかったことと，メッシュサイズなど解析条件の更なる見直しが必要と考えられる．

今後の展望として，単粒研削実験及び有限要素法解析ともに，良好な結果を得ることができた．一方で，時間の関係上どちらも試行回数が少なく掘り起こし現象そのものの解明には至ることができなかった．単粒研削実験に関しては，今回派遣先で行った実験と同様の実験を研究室で行うことができる．引き続き研究を進めていく所存である．有限要素法解析に関しても，今後も派遣先の大学と連携を取り解析を実施していく予定である．解析の妥当性を得ることができれば，実験で膨大なデータを取る必要なく，様々な条件で検討できるため，今後も実験と解析の両方のアプローチで研究を進める予定である．

最後に，まず英国での研究では，研削加工の加工現象の解明において，世界的に権威のある Xun Chen 教授のもとで研究を行えたことで，工作物の掘り起こしの解明に貢献できる大きな成果を得ることができた．また，Chen 教授は研削現象の FEM 解析に大変精通しており，FEM 解析の有効性とその効果を学ぶことができた．スロベニアでの研究発表では，研究に関する多くの質問をいただくことができた．さらに，研削加工に関する海外の最新研究を拝聴することができ，今後の研究に役立つ多くの知見を得ることができた．

以　　上