

## 技術論文

# モータグレーダのCutting Edge 摩耗と掘削抵抗に関する研究

## Study on Cutting Edge Wear and Excavation Resistance of Motor Grader

武田 周  
Takeda Shu  
上前 健志  
Takeshi Kamimae  
小林 慎太郎  
Shintarou Kobayashi

土工作业や除雪作業などで使用されるモータグレーダは、路面を切削する能力に優れるため、硬い土砂路面の不整（凹凸）を削り均す道路メンテナンスや、踏み固められて硬化した圧雪・氷を取り除く圧雪除去などの作業において、ブレード先端に装着されているCutting Edgeは非常に過酷な状況で使用されている。このためCutting Edgeには、耐摩耗性の向上や掘削抵抗低減といった高効率化への改善が期待される。

本研究では、Cutting Edge形状の摩耗速度および掘削抵抗への関係について、シミュレーションと実験で確認したので報告する。

Motor graders used for such purposes as earthwork and snow removal work have excellent capacity of cutting road surfaces. Therefore, the cutting edges mounted on their blade tips are used under extremely severe conditions in the works such as road maintenance (levelling a hard earth/sand road surface by cutting its unevenness) and removal of compacted snow (removing the compacted snow and/or ice trodden down and hardened). Thus cutting edges are expected to be improved to higher efficiency in terms of enhanced abrasion resistance and reduction of excavation resistance.

This report presents our study in which we verified the relations of a cutting edge's shape with the wear rate and excavation resistance by simulation and test.

**Key Words:** Cutting Edge, 耐摩耗性, 掘削抵抗, 接地面積, シミュレーション, 実験

### 1. はじめに

モータグレーダのブレード先端に装着されるCutting Edge（図1参照）は、硬い土砂路面や圧雪などを相手に作業をする場合、摩耗が激しくなる。除雪時の路面状況によっては一度の除雪出動でCutting Edgeの摩耗代が無くなり交換となってしまうこともある。

またエッジ摩耗が進むと、路面との接地面積が大きくなり、掘削抵抗が増大するため、Cutting Edgeの貫入性および作業燃費が悪化する。そのため、圧雪除去のような硬い路面に対しては、オペレータはパワーチルト（ブレードを前後に傾斜させる）機能を使用し、エッジ刃先を研ぐようにしながら作業をすることも多い。

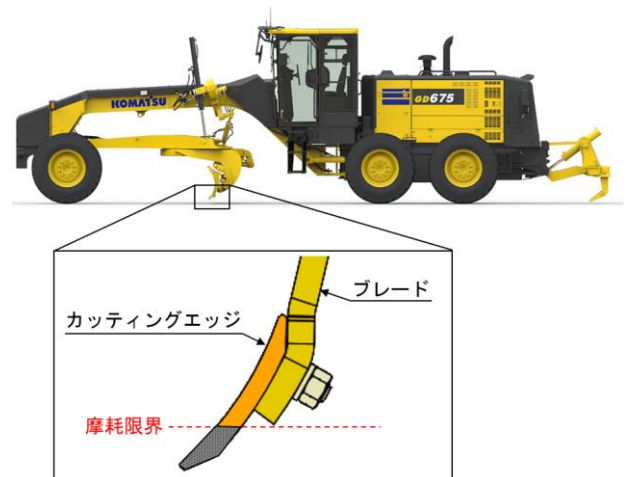


図1 Cutting Edge

従って、カッティングエッジの耐摩耗性や掘削抵抗を改善することが出来れば、エッジ交換コストの低減以外にも、掘削作業性の改善、燃費向上などの効果が期待できるが、これまでカッティングエッジの材質に対する改善は実施されているものの、その形状についての改善はほとんど検討されておらず、初期のグレーダから JIS 準拠の形状のまま変更されていない。

そこで本研究では、形状改善によるカッティングエッジの高効率化（長寿命化・掘削抵抗低減）を目的とし、金沢大学との産学連携共同研究で金属切削加工の見地から、カッティングエッジ形状と摩耗速度および掘削抵抗との関係をシミュレーションと模擬実験で確認した。

## 2. 実摩耗の進展

図 2 にグレーダ実機でのカッティングエッジ摩耗進展状況を示す。摩耗はエッジ先端から逃げ面にかけてほぼ鉛直方向に進展し、ブレード本体が摩耗する手前で寿命到達となる。すくい面の摩耗はほとんど見られない。

## 3. 切削シミュレーションによる解析

カッティングエッジ形状の検討を行うにあたり、モータグレーダ実機に搭載しての確認はコストと時間が掛かる上に、土砂や圧雪の成分・密度および試験条件にも大きく結果が左右されるため、定量的な比較評価は困難である。そのため本研究では、金属加工に対して使用されている“切削シミュレーション”を用いることで、掘削現象の解析を実施した。

### 3.1 シミュレーションモデル

切削シミュレーションには、比較的容易に塑性変形による材料除去現象のシミュレーションが可能な、汎用ソフトの DEFORM<sup>®</sup>を使用した。図 3 に DEFORM<sup>®</sup>での解析モデルを示す。

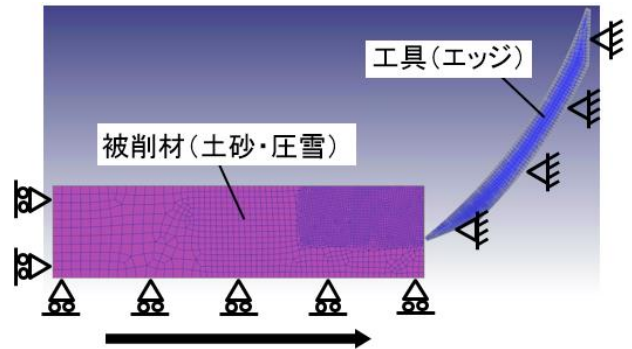


図 3 シミュレーションモデル

但し、シミュレーションにて現実の掘削現象を再現するには、工具（エッジ）および被削材（土砂・圧雪）の機械・物理特性に関するデータが不可欠であるが、土砂や圧雪の物性値は一定ではなく、これを特定するのは困難であるため、本シミュレーションでは物性値の合わせこみは行わないこととし、難易度が高い定量的な評価（摩耗量の算出）を目指すのではなく、定性的な評価（工具形状によって摩耗量がどのように変化するか）に主眼を置いた。



図 2 エッジ摩耗進展

### 3.2 切削シミュレーションと実掘削との乖離の修正

金属切削加工では切りくずによるすくい面摩擦の影響が大きいですが、これに対し実掘削では2項で述べたように、すくい面側の摩擦はほとんど見られず、逃げ面のみで摩擦が進展しているのが、金属切削加工と異なる点である。

また、グレーダ実機にて圧雪面に対する掘削の様子を観察したところ、排出された圧雪は図4のようにせん断型となり、路面の圧雪とは完全に分断されるため、すくい面側の排雪は摩擦にほとんど影響しないと考えてよい。土砂の掘削においても排土は分断され連続性はほぼ残らないため、圧雪と同様と考えることができる。このことは2項の摩擦状況確認結果とも一致する。



図4 圧雪掘削

従って、従来どおりの切削加工のシミュレーションではすくい面摩擦が大きくなってしまふ点で実掘削と大きく乖離するため、モデルを次のように修正した。(図5参照)

まずは DEFORM<sup>®</sup>で短時間の切削解析を行い、変形後メッシュの節点位置を出力して、MATLAB<sup>®</sup>に送る。エッジ先端で掘削されてすくい面側に巻き上げられた切りくず(排土・排雪)を MATLAB<sup>®</sup>でモデル形状から削除し、再度 DEFORM<sup>®</sup>にフィードバックさせるというサイクルを自動で繰り返し、モデル形状を逐次修正し続けるようにすることで、すくい面の影響を無くし、逃げ面摩擦のみを評価できる解析手法とした。

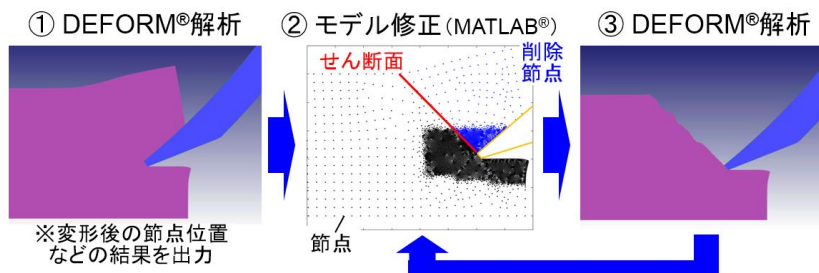


図5 すくい面の切りくず除去サイクル

### 3.3 エッジ形状の更新

切削加工では一般的に工具が摩耗した時点で寿命と判断するため、切削シミュレーションにおいても工具形状が摩耗により変化するという概念が無く、カッティングエッジのように寿命に至るまですり減り摩耗しながら形状を更新していくような解析にはそのままでは対応できない。そこで、以下の方法でエッジ形状を更新できるように改善を行った。

掘削時の面圧とすべり速度の分布から、摩耗現象のモデルである“Archardモデル”により、摩耗深さを図6に示す式で求めることができる。その摩耗量から一定時間後のエッジ形状を推定し、続く解析にフィードバックできるようにした。

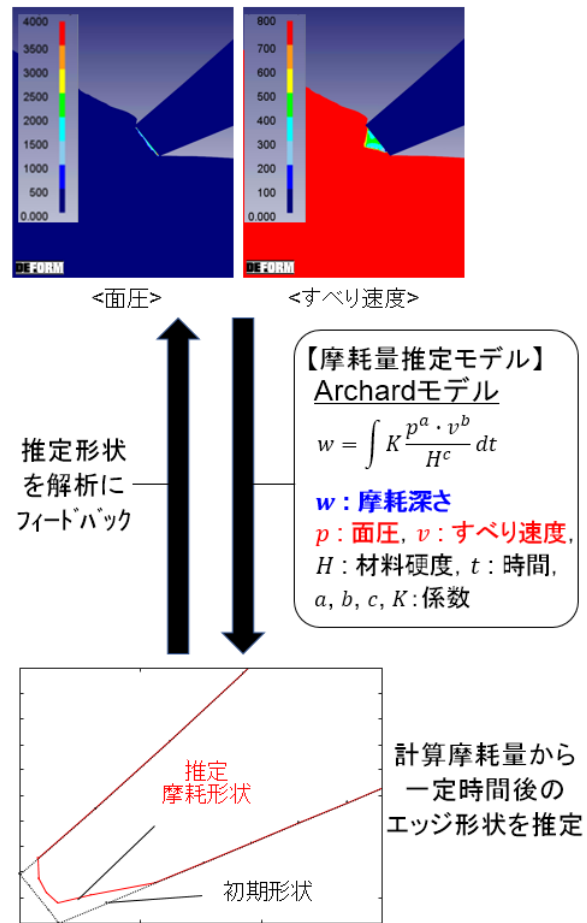


図6 エッジ形状の更新方法

計算摩耗量から一定時間後のエッジ形状を推定



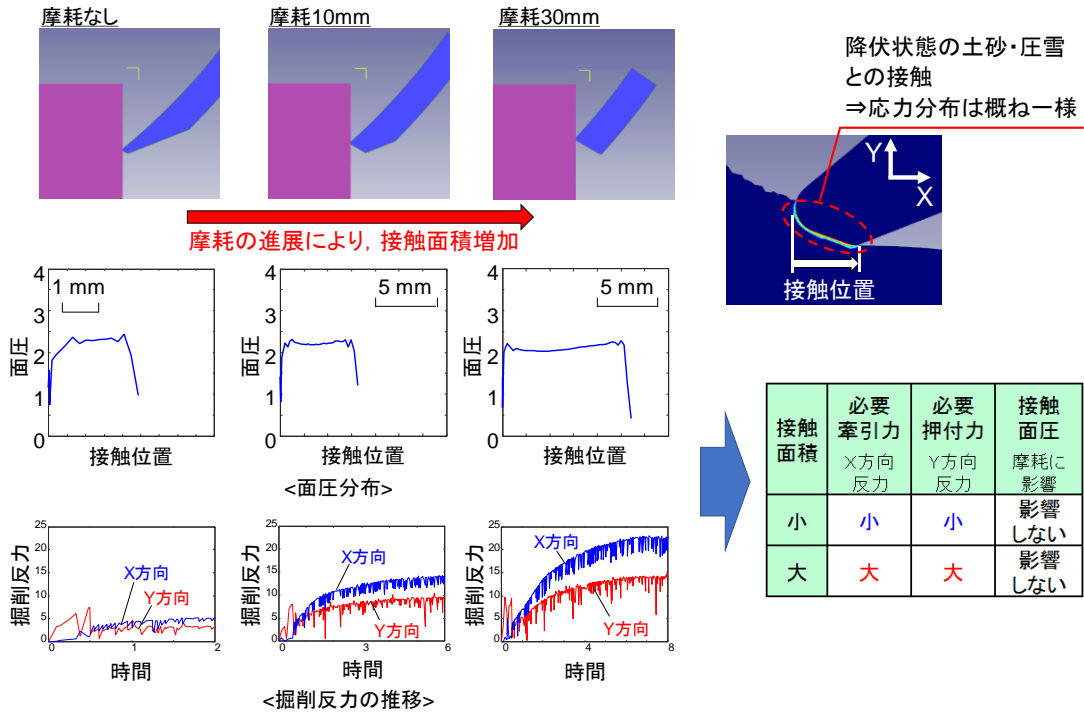


図7 シミュレーション結果

### 3.4 シミュレーション結果

シミュレーションによって、エッジ初期形状時と摩耗時でそれぞれ掘削時の面圧と掘削反力を比較した結果を図7に示す。

当初は、接触面積が大きいと掘削に必要な力が分散されて面圧が低くなると予測していたが、予測に反して、摩耗が進展し接触面積が増加しても、面圧はほとんど変わらないという結果が得られた。面圧が変わらないため、接触面積の増大に伴い、掘削反力はX方向（必要牽引力に影響）、Y方向（必要ブレード押付力に影響）ともに増加している。

これらの結果から、掘削作業で実際に仕事をしているのはエッジの先端部分のみであり、先端から後方逃げ面の接触部分については、抵抗となって掘削抵抗を増大させているのみと考えることができる。

### 4. 模擬実験による検証

切削シミュレーション結果の妥当性を検証するため、旋盤を活用した圧雪掘削の模擬実験を行った。

#### 4.1 模擬実験方法

図8に実験の模式図を示す。細かく砕いた氷に実験を加速させるための砥粒を分散混入させてプレス機で成型圧縮した円筒状の模擬圧雪を、再度冷凍後に被削物として旋盤で保持し、回転速度を与える。その端面に3Dプリンタでカッティングエッジ先端形状を模して製作した樹脂(PLA)製の模擬エッジを押し当てることにより、圧雪の掘削作業を再現する。実験は、実際の除雪作業を想定した掘削速度と切り込み量を実験のスケールに換算した条件で実施した。



図8 模擬実験装置

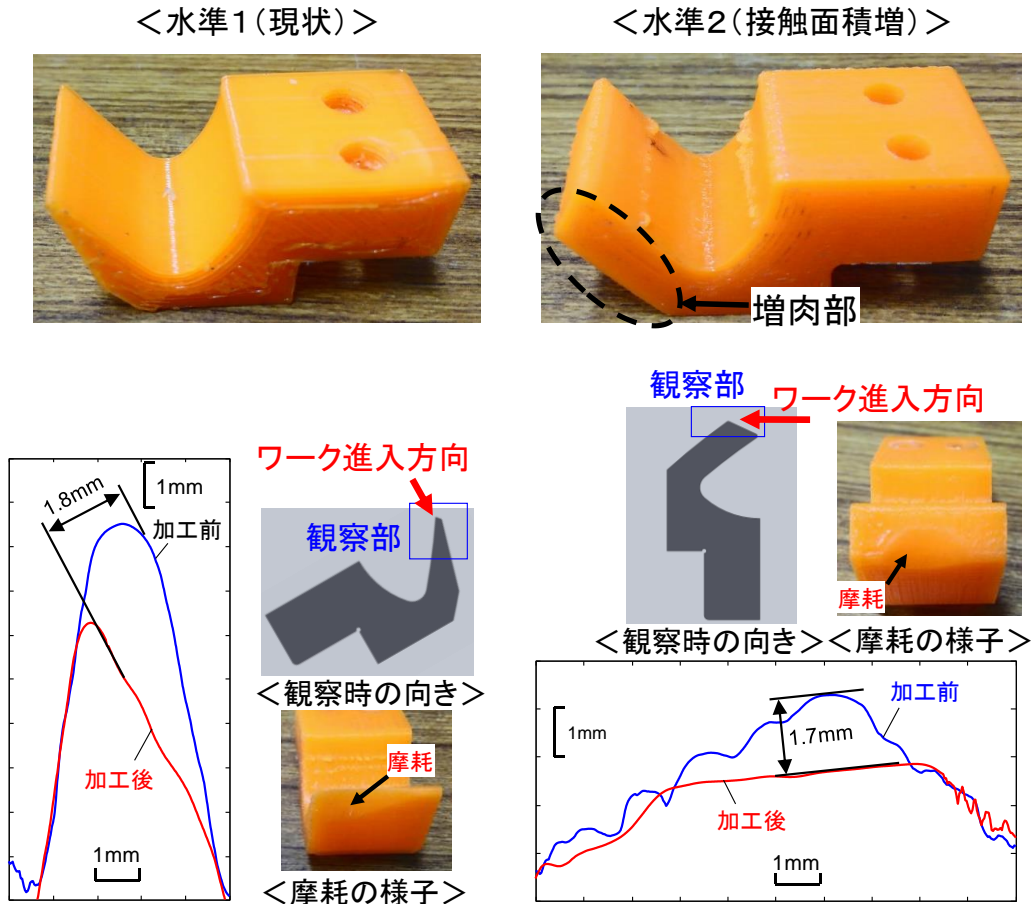


図9 模擬実験での摩耗量比較結果

4.2 模擬実験結果

現状のエッジ先端形状を模擬した水準1と、逃げ面を肉厚にして意図的に接触面積を増加させた形状の水準2にて、模擬実験での刃先摩耗量の比較評価を行った結果を図9に示す。

実験の結果、一定時間経過後の摩耗深さは、接触厚さ(⇒接触面積)によらずほぼ同じであり、シミュレーションと同様の結果となることが確認できた。

また、一定時間毎の摩耗による形状変化を計測した結果についても、図10に示すとおり初期摩耗後の摩耗速度は減少することなく、ほぼ一定となり、接触面積に大きく依存しないことが確認できた。

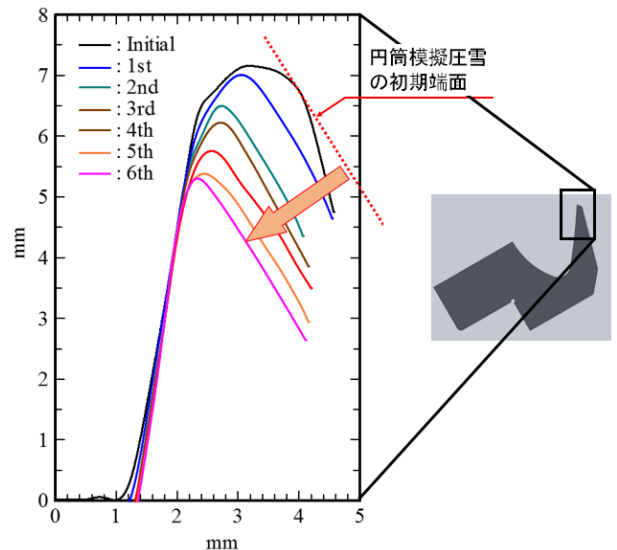


図10 時間ステップ毎のエッジ形状推移

## 5. おわりに

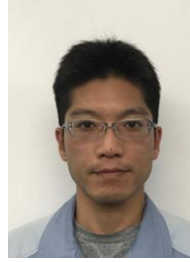
グレーダでの掘削において、カッティングエッジの刃先接地部の面圧はエッジ接地面積に依存しないことがシミュレーションと解析にて確認できた。この結果から、厚さを含めたエッジ形状の変更によって摩耗寿命を大幅に改善するのは難しいという結果が得られたが、一方で接地面積が小さい程、切り込み量に対する掘削反力を少なくできることも確認出来たため、今後も掘削効率低減を目指したカッティングエッジの検討を継続したい。

### 筆者紹介



Takeda Shu

たけだ しゅう  
武田 周 1983年、コマツ入社。  
開発本部 車両第三開発センタ所属



Takeshi Kamimae

かみ まえ たけ し  
上前 健志 1999年、コマツ入社。  
開発本部 車両第三開発センタ所属



Shintarou Kobayashi

こばやし しんたろう  
小林 慎太郎 2008年、コマツ入社。  
開発本部 車両第三開発センタ所属

### 【筆者からひと言】

建機における掘削現象に対して、切削加工分野からの検討をいかに適用できるか、当初は大きな不安もありましたが、本研究で得られた知見を生かして今後の改善に繋げていきたいと思えます。

最後に、産学連携共同研究でご協力を頂きました金沢大学の細川先生、橋本先生および学生の皆様に心より感謝申し上げます。