

技術論文

耐土砂摩耗部品の耐久性向上の取り組み —高硬度高靱性材料・熱処理技術の開発と部品形状の最適化— Efforts to Improve Durability of Parts Subject to Earth and Abrasion - Development of High Hardness and High Toughness Materials, Heat Treatment Technology, and Optimization of Part Shapes -

山本 幸治
Koji Yamamoto
王生 翔平
Shohei Ikurumi

建設機械部品の更なる長寿命化やコンパクト化のためにはより高硬度で高強度・高靱性な材料が求められる。硬度と靱性を両立する技術開発をおこなっており、本報では開発材の基礎特性と部品への適用に向けた取組みについて紹介する。

In order to extend the life and reduce the size of construction machine parts, materials with higher hardness, strength and toughness are required. We have been developing technology to achieve both hardness and toughness. In this report, we like to introduce the fundamental characteristics of our developed materials and efforts taken for application to parts.

Key Words: 高硬度高靱性, ツース, 耐摩耗性向上, 貫入性向上

1. はじめに

建設機械において足回りや GET (Ground Engaging Tool) 部品 (図 1) は土砂や岩盤を相手にするため摩耗しないよう高い硬度が求められるが、同時に走行時・掘削時の静的あるいは衝撃的な負荷に対して割れ・欠けがないよう必要な強度と靱性を確保しなければならない。しかし、鉄鋼材料において一般に強度は硬度と比例するが、図 2 に示すように靱性は硬度とトレードオフの関係にあることが知られており、安全性のために硬度を抑えて靱性を確保しているのが現状であるが、摩耗寿命としては十分ではない。必要な強度・靱性を保ったまま高硬度化することができれば、部品の長寿命化やコンパクト化が期待される。この鉄鋼材料の宿命的な課題に対し、大阪大学 殿-山陽特殊製鋼殿-当社の共同研究において、鋼の合金成分の最適化と熱処理プロセス制御により、高硬度（高強度）でかつ靱性に優れた合金成分及び熱処理技術^[1]を開発したため報告する。併せて、高硬度高靱性材の適用例として、お客様の LCC (Life Cycle Cost ; 生涯費用) 向上や生産効率向上を狙ったツースでの取組みについて紹介する。



図 1 足回り・GET 部品の概要

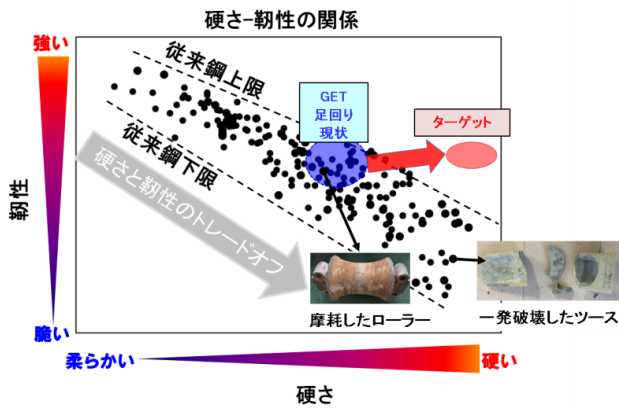


図2 硬度と靱性の関係

2. 高硬度高靱性鋼について

2.1 従来の課題と解決策

鋼において高い硬度を得る手法としてはオーステナイト化温度以上の高温から急速冷却(焼入れ)することで、マルテンサイト組織を得ることが一般的であり、ビッカース硬度で700HV前後の高い硬度を得るためには0.5% C以上の炭素含有量の鋼を用いる。しかし、一般的な高硬度鋼は衝撃的な負荷により旧オーステナイト粒界に沿った割れである粒界破壊や結晶のへき開面に沿ったへき開破壊を呈するため、その靱性値は低い。特に共析濃度以上の過共析鋼においては図3(a)に模式図を示すように結晶粒界上の炭化物が粒界破壊を誘発する。また、粒界の炭化物を消失させるためにオーステナイト単相領域からの焼入れをした際も、ピン止めの役割を担っていた炭化物の消失により、結晶粒の粗大化やマトリクスに固溶C量増大によるマルテンサイトのレンズ化により、やはり脆弱である。もし、高炭素鋼において、結晶粒の粗大化を防止し、粒界上の炭化物の除去と粒内炭化物の微細分散が達成されれば、高い硬度で、なおかつ、靱性に優れた鋼を得ることが期待される。そこで、過共析鋼のオーステナイト化時における炭化物の消失過程を詳細に調べたところ、粒内炭化物を残存させたまま粒界上の炭化物を優先的に固溶・消失させることが可能な画期的な成分・熱処理条件を発見した。また、その熱処理プロセス中に高強度化・高靱性化に効果的な結晶粒微細化も同時に達成され、図3(b)に示す模式図のような微細組織が得られる。この粒界改質と結晶粒微細化の一連のプロセスをGBA処理(Grain Boundary Amelioration)と呼ぶこととした。

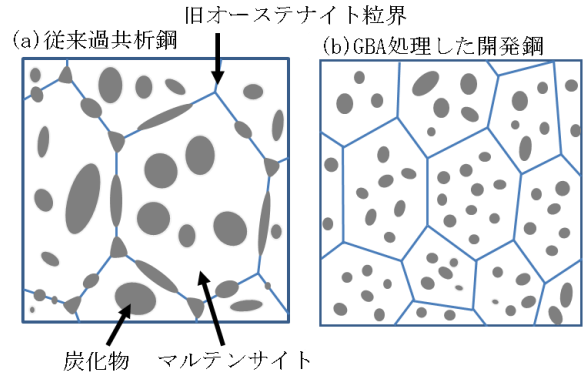


図3 従来過共析鋼とGBA処理した開発鋼の微細組織の模式図

2.2 実験結果

2.2.1 微細組織

汎用軸受鋼として一般的なJIS SUJ2鋼のC量、Mn量、Cr量を調整した開発鋼について適切な焼ならしと球状化焼鈍しを実施後、図4に示すGBA処理と低温焼戻しを行った。その時の微細組織を図5に示す。粒界上の炭化物が少なく、粒内に1μm以下の微細炭化物が多量に分散し、かつ旧オーステナイト粒が4μm以下と微細なことがわかる。

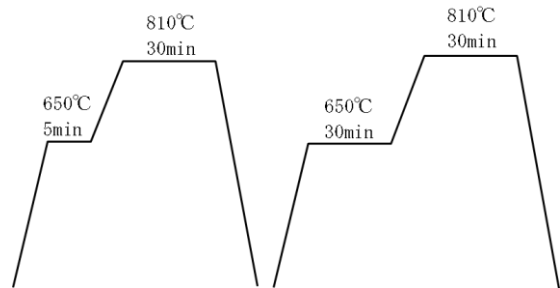


図4 GBA処理

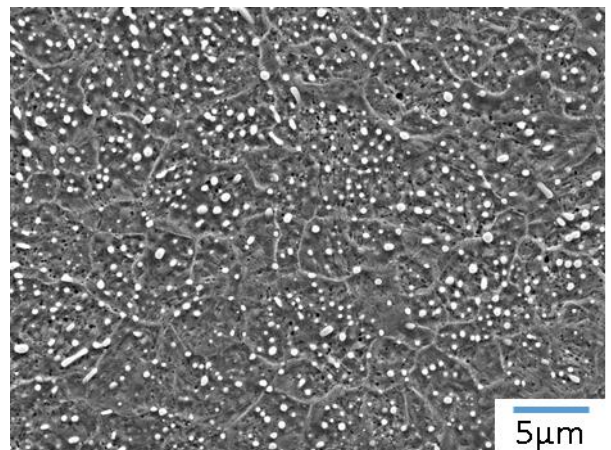


図5 GBA処理した開発鋼の微細組織

2.2.2 シャルピー衝撃試験

10RCノッチの試験片にて計装化シャルピー衝撃試験を実施した際の荷重 - 変位曲線を図 6 に示す。従来高硬度材と比較し、破断に至るまでの変位量が多く、エネルギーで5倍以上となる約 140 J/cm² と HRC60 の高硬度にもかかわらず極めて高い衝撃値を確認した。また、図 7 に示す破断面のマクロ観察においても開発鋼が従来高硬度材に比べ大きく変形していることが確認できる。また、SEM によるミクロ観察では従来高硬度材が典型的な粒界破壊であるのに対し、開発鋼+GBA 処理材は微細なディンプルをもつ延性破壊の様相であった。開発鋼に GBA 処理することで粒界破壊を抑えることに成功し、破壊モードからも本開発材が優れていることを確認できた。

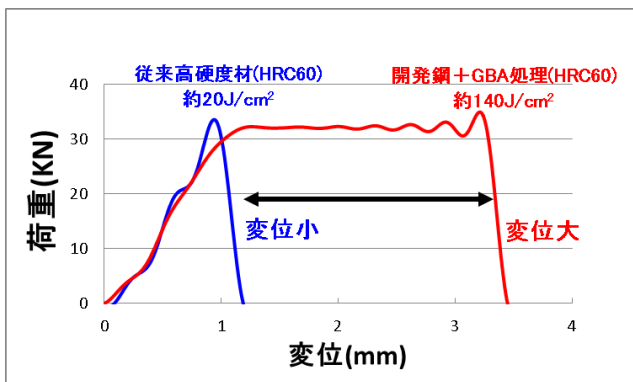


図 6 計装化シャルピー衝撃試験 荷重 - 変位曲線

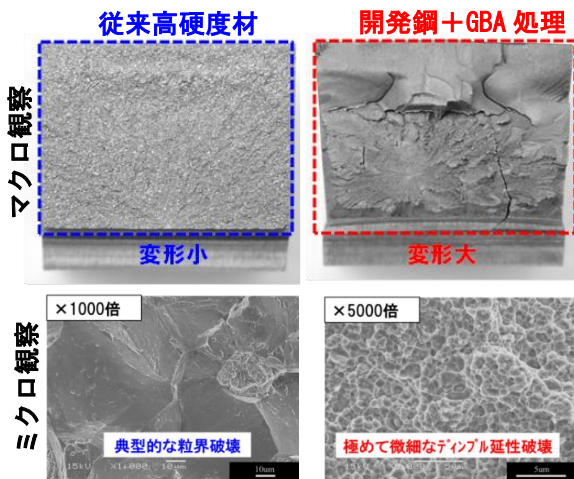


図 7 衝撃試験片の破断面観察

2.2.3 引張試験

引張試験概要を図 8 に示す。高硬度材であるためこのような引張試験形状とした。引張試験結果を図 9 に示す。

従来高硬度材は弾性変形中に破断していることがわかる。一方、開発鋼+GBA 処理した鋼は降伏したのち変形して破断しており、破断変位は 5 mm 以上、破断荷重は 2400 MPa と高い水準であった。

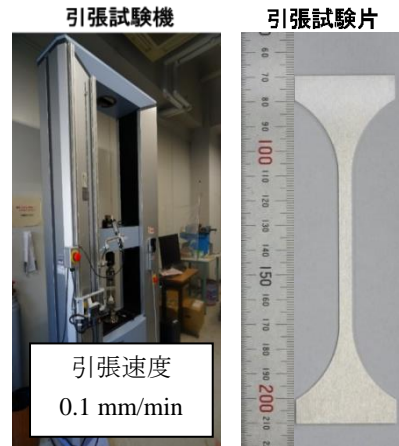


図 8 引張試験概要

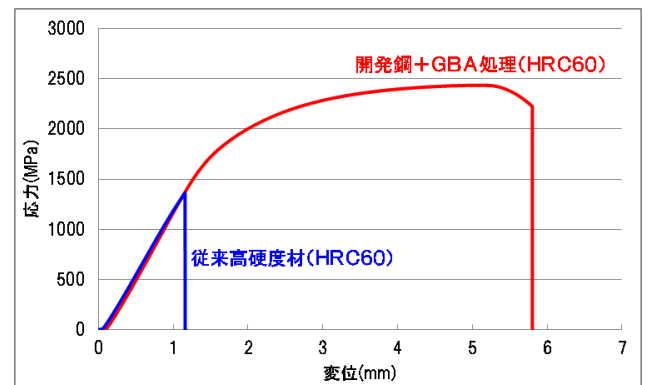


図 9 引張試験結果

2.2.4 曲げ試験

適用部品として想定しているブルドーザーのリッパポイントという部品は整地前に地面を耕すクワのような働きをする部品で、地面に突き刺した状態で走行する。そのためリッパポイントの折損を評価するために曲げ試験を実施した。曲げ試験の概要を図 10 に示す。曲げ試験結果を図 11 に示す。引張試験と同様に従来高硬度材が降伏前に破断しているのに対し、開発鋼+GBA 処理材は降伏後、10 mm 程度たわみ、破断応力は 4500 MPa 以上と高い水準であった。

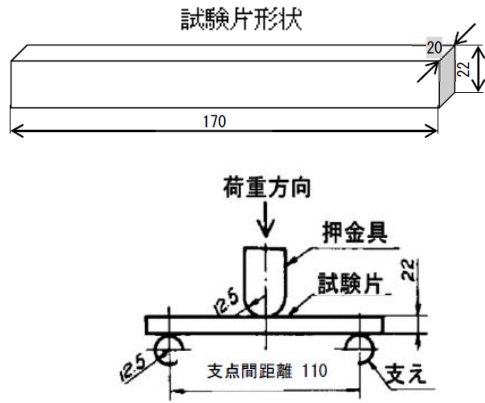


図 10 曲げ試験概要

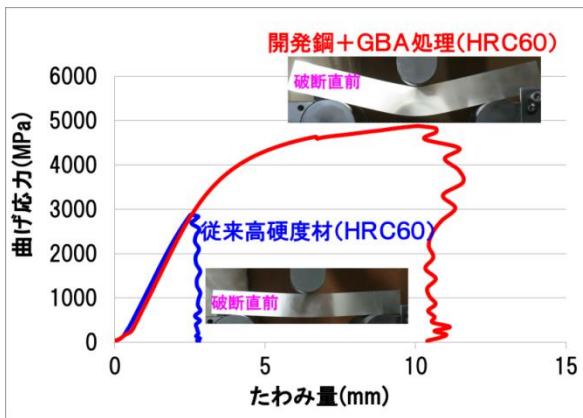


図 11 曲げ試験結果

3. 高硬度高靱性鋼を生かしたダントツ部品の開発事例 長寿命ツース，高貫入性ツース

3.1 長寿命ツースの開発

バケットツースとは図 12 に示すようにバケットの先端についており掘削時に岩石や土砂と接するため高い耐摩耗性と靱性が要求される。従来のツースでは、靱性を確保し折損リスクを抑えるため、硬度を下げた耐摩耗性と耐折損性のバランスを取っている。この現状に対して、ツースへの高硬度・高靱性鋼の適用することにより、折損リスクが少なくかつ耐摩耗性に優れたツースが実現可能である。



図 12 バケットツース

先述の高硬度・高靱性材を適用したツース（長寿命ツース）の試作結果を示す。図 13 に示す通り、長寿命ツースは現行ツースに対して、硬度 — 靱性ともに向上していることが確認できる。

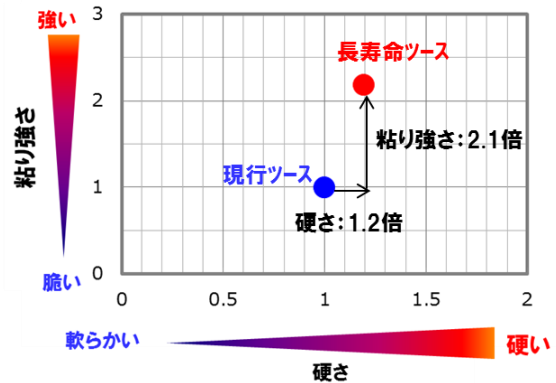


図 13 長寿命ツースの硬さ - 粘り強さ

本長寿命ツースと現行ツースの寿命を実機で評価した。評価結果を図 14 に示す。ツースの摩耗長さが同等になるまでの時間をツースの寿命として評価したところ、開発ツースは現行ツースの約 1.8 倍の摩耗寿命を示した。

また、高硬度化の背反として挙げられる、折損や欠けの発生はなかった。

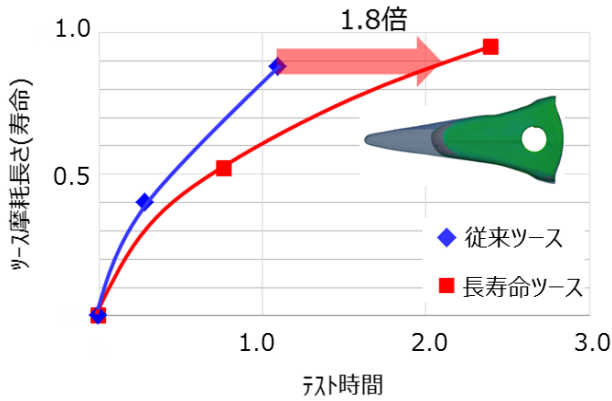


図 14 長寿命ツース実機テスト結果

3.2 高貫入性ツース ユーザー生産性向上

ツースは岩石や土砂を効率よく掘削するために必要不可欠な部品であり、上記で述べた耐摩耗性以外に掘削効率や燃費向上のために貫入性が要求される。従来のツースにおいてはその摩耗寿命や折損リスクのため、形状面での制約も大きい。これに対して、開発材の高硬度・高靱性という特徴を生かし、細く高貫入な形状にしても折れにくく、かつ同等以上の摩耗寿命を有するツースが実現可能である (図 15)。

	現行形状		高貫入性形状
形状			
材料	現行材	高硬度・高靱性	高硬度・高靱性
使用中			
特徴	既存ツース	長寿命	長寿命 高貫入

図 15 高貫入ツース概要

まず、高い貫入性を有するツース形状を、ロボットと 3D プリンタで製作した樹脂モデルを使用して探索した。試験は図 16 に示すように、ロボットにロードセルとツース樹脂モデルを取付け、礫中にツースを貫入させたときの抵抗の違いを貫入性の指標として評価を行った。貫入性に影響を与える要因を調査するため、先端幅、ツース全長、ツース断面積を変えた複数のツース樹脂モデルにて評価を実施した (図 17)。

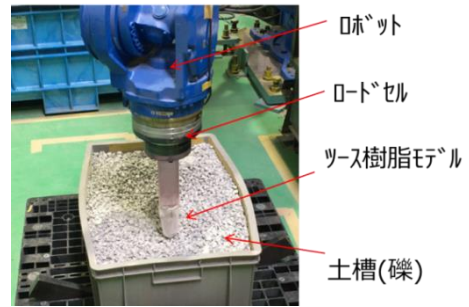


図 16 ロボット模擬試験概観

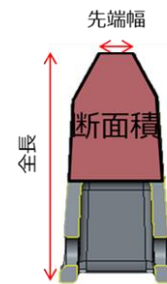


図 17 形状評価項目

ロボット模擬試験での試験結果を図 18 に示す。図 18 に示す通り、ツース先端幅と貫入抵抗に高い相関が見られ、先端を細くするほど貫入抵抗が下がる傾向にあることが分かった。

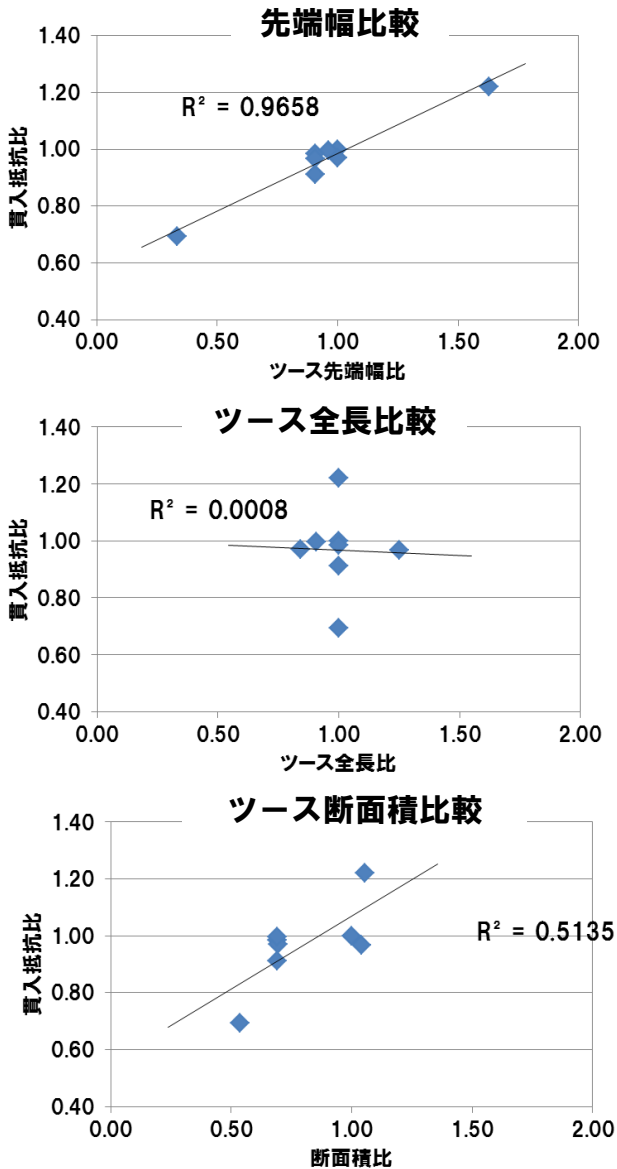


図 18 ロボット模擬試験結果 (各形状要因貫入抵抗)

ロボット模擬試験の結果を元にツース先端を細く尖らせたツース形状を考案した (図 19)。考案したモデルに関して、ロボットで樹脂ツースを礫に数千回貫入させ、摩耗したときの貫入抵抗の比較評価を実施した。結果を図 20 に示す。高貫入形状では、摩耗時にもツースの貫入抵抗が低いため、ツースが刺さらないことによる再掘削動作の低減が見込める。その結果、作業性が向上しユーザー生産性の向上が期待できる。

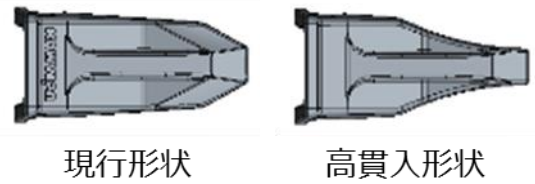


図 19 高貫入形状ツース

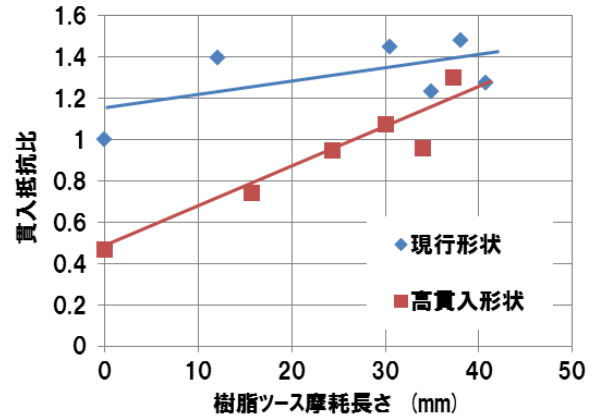


図 20 摩耗時の貫入抵抗変化

今後、図 21 のように実体品を試作したため、実機での貫入性、耐久性、摩耗寿命の評価を進めていく。



図 21 高貫入ツース実体品

4. おわりに

本報告書「耐土砂摩耗部品の耐久性向上の取り組み」の研究・開発において得られた結果を以下に記述する。

(1) 開発鋼に GBA 処理を実施することで、結晶粒の微細化や脆化原因である粒界炭化物の制御に成功し、従来高硬度材の 5 倍以上の靱性向上を達成した。また、引張試験・曲げ試験においても、従来高硬度材と比較し、大幅な変位の向上が確認された。

(2) 開発した高硬度高靱性材をツールに適用し、実機テストにて折損がないことと、1.8 倍の摩耗寿命を確認した。

(3) 高貫入性形状のツール開発により、掘削時の砂岩への貫入抵抗が低減することが確認できた。その結果、掘削時の作業性が向上し、燃費向上やユーザー生産性の向上が期待できる。

参考文献

- 【1】 南埜宜俊，鈴木淳一郎，中村公俊，平塚悠輔，常陰典正，山本幸治，宮部一夫：CAMP-ISU，29 (2016)，754。

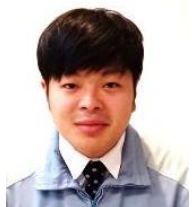
【筆者からひと言】

開発した新材料は単に部品の長寿命化だけではなく、材料の特性を生かした構造変更により、より付加価値の高い「ダントツ商品」を生み出すことを目標にしています。今回の事例に留まらず、様々な部品に適用されるよう引続き技術開発に取り組んでいきます。

産学連携共同研究を実施頂きました大阪大学南埜教授および学生の皆様に心より感謝いたします。

なお、本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託事業「エネルギー・環境新技術先導プログラム」の支援を受けて行っており、関係の皆様方に対し、ここに謝意を表します。

筆者紹介



Koji Yamamoto
やまもと こうじ
山本幸治 2013年，コマツ入社。
生産本部 生産技術開発センター



Shohei Ikurumi
いくるみ しょうへい
王生翔平 2014年，コマツ入社。
生産本部 生産技術開発センター