

機関番号：54601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560120

研究課題名（和文） 高密着性・高アブレシブ性を有する新しい切削工具用被膜の開発

研究課題名（英文） Development of new coating film having both high adhesion and high abrasive-wear-resistance for cutting tools

研究代表者

和田 任弘（WADA TADAHIRO）

奈良工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：10141912

研究成果の概要（和文）：切削加工において、コーテッド超硬合金工具は有効な工具材料と思われる。TiN や (Ti, Al) N が被膜として一般に用いられている。Ti-W 基膜が開発された。Ti-W 基膜は、優れた密着性を有した。しかし、Ti-W 基膜の硬さは、(Ti, Al)N 膜に比べ低かった。そこで、Ti-W-Si 基膜、すなわち (Ti, W, Si)N、(Ti, W, Si)C、あるいは (Ti, W, Si)(C, N) 膜が開発された。これらの新しい Ti-W-Si 基膜は、TiN、(Ti, Al)N 膜に比べ高密着性および高アブレシブ性を示す。

研究成果の概要（英文）：In cutting, coated cemented carbide tools seem to be effective tool materials. TiN or (Ti, Al)N are generally used as the coating film. A titanium-tungsten based coating films have been developed. The titanium-tungsten based coating films exhibited a superior critical scratch load. However, the hardness of the titanium-tungsten based coating films were lower than that of (Ti,Al)N coating film. So, titanium-tungsten-silicon based coating films, namely (Ti, W, Si)N, (Ti, W, Si)C or (Ti, W, Si)(C,N) coating film, have been developed. These newly titanium-tungsten-silicon based coating films exhibit both superior critical scratch load and hardness as compared with TiN, (Ti, Al)N coating film.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
2010 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：機械工作

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：切削、工具摩耗、コーテッド工具、焼入れ鋼、W 系被膜

1. 研究開始当初の背景

高アブレシブ性に優れたセラミックス膜を、耐久損性に優れた超硬合金母材にコーティングする技術は、新しい切削工具材を開発するために、極めて有効な方法である。切削工具用被膜としては、Ti をターゲット（陰極電極）にした TiN 膜が工業的に多く使用され

てきた。しかしながら、TiN 膜は耐密着性にやや劣る。そこで、研究代表者は、超硬合金母材の主成分である WC に着目し、被膜に W を加えることで密着力を高めることが可能であると考え、ターゲットにタングステン (W) を加えた Ti-W 合金をターゲットに使用した新しいタイプの (Ti, W) N 膜を開発

した。次に、(Ti, W) N 膜の被膜特性を調べた結果、(Ti, W)N 膜の密着力は 148N 程度で、TiN 膜の 64N に比べ、2 倍以上高いことが分かった。さらに、(Ti, W)N 膜コーテッド工具によるステンレス鋼の切削においても、TiN 膜に比べ長時間の切削が可能であることも明らかにした。

さて、金型鋼 SKD11 (HRC60) のような焼入れ鋼の加工は研削や放電加工によって行われているが、切削によって加工することができれば、金型製作における加工能率が飛躍的に向上する。そこで、Ti ターゲットにアルミニウム (Al) などの第 2 金属元素を添加した窒化チタンアルミニウム (Ti, Al)N 膜が開発された。この (Ti, Al)N 膜は、従来の TiN 膜に比べ高い被膜硬度を有し、さらに耐酸化性に優れているため、現在、被膜の主流になっている。

(Ti, W)N 膜コーテッド工具で、SKD11 (HRC60) を切削した結果、(Ti, W)N 膜コーテッド工具の寿命時間は、(Ti, Al)N 膜コーテッド工具に比べやや短命であった。これは、(Ti, W) N 膜の密着力 148N は、(Ti, Al)N 膜の 73N に比べ高いが、(Ti, W) N 膜の硬さ HV1970 は、(Ti, Al)N 膜の HV2710 に比べ低いことが主因であることが分かった。このことから、焼入れ鋼の切削においては、被膜の高硬度化による高アブレシブ性が必要であり、高密着性・高アブレシブ性に優れた被膜の開発が望まれている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高密着性・高アブレシブ性に優れた (Ti, W, Si) 系被膜を開発し、この被膜特性を明らかにする。さらに、この被膜を持つコーテッド工具で、クロム鋼、焼結鋼、および焼入れ鋼の切削を行い、工具摩耗を調べ、開発した被膜の有効性を明らかにする。

3. 研究の方法

上述のように、本研究の目的は、高密着性・高アブレシブ性いずれにも優れた切削工具用被膜を提案し、この被膜の切削性能を明らかにすることである。新しい被膜を開発するためには、チタンに第 2 金属元素を加えた合金をターゲットに用い、N₂ ガス、あるいは CH₄ ガス雰囲気中で PVD コーティングを行う方法が工業的に多く用いられている。本研究では、ターゲットとして、Ti-W-Si 合金を使用する。次に、この合金ターゲットを用い、N₂ ガス、あるいは CH₄ の反応ガス雰囲気中で超硬合金を母材として PVD コーティングを行い 3 種類の (Ti, W, Si) 系被膜、すなわち (Ti, W, Si)N 膜、(Ti, W, Si) (C, N) 膜、(Ti, W, Si)C 膜を形成させる。さらに、これらの被膜特性、工具摩耗を調べ、切削工具用被膜として適応可能かどうかの判断を行う。

上記の研究目的を達成するために、以下の手順によって研究を行った。

(1) Ti-W-Si 合金ターゲットを製作した。
(2) PVD コーティング法によって、超硬合金 K10 種母材に、(Ti, W, Si) 系被膜を形成させた。

(3) 形成させた (Ti, W, Si) 系被膜について、被膜特性 (被膜厚さ、被膜硬度、密着力) の測定を行った。

(4) これらの試作 PVD コーテッド超硬工具で各種の被削材の旋削を行い、工具摩耗を調べ、市販の (Ti, Al) N 膜 PVD コーテッド超硬工具との比較を行った。

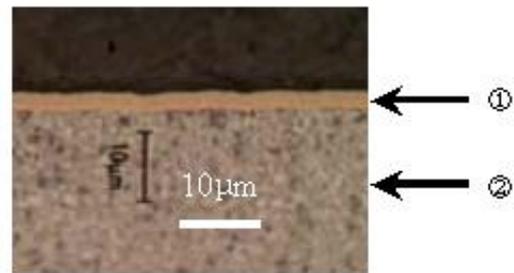
(5) (Ti, W, Si) 系被膜を超硬ソリッドエンドミルにコーティングし、側面切削を行い、工具摩耗を調べた。

(6) (Ti, W, Si) 系被膜が切削工具用被膜として適応可能かどうかの判断を行った。

4. 研究成果

(1) 被膜形成状態

(Ti, W, Si)N の膜形成状態を調べるために、被膜断面の顕微鏡観察を行った。図 1 にその結果を示す。ここで、①が (Ti, W, Si)N で、②が母材である。被膜断面の顕微鏡写真から、母材と被膜の界面において、(Ti, W, Si)N が母材表面の凹凸部に入り込んでいる。このことから、母材と被膜の界面において、(Ti, W, Si)N 膜と母材が十分に密着していることが分かる。また、被膜の膜厚もほぼ一定である。



①: (Ti, W, Si)N coating film

②: Substrate

図 1 被膜断面

(2) (Ti, W, Si) 系被膜の特性

表 1 に、各種被膜の膜厚、スクラッチテストによる臨界荷重、被膜硬度の測定結果を示す。(Ti, W, Si)N 膜の膜厚は 2.5~4.1 μm で、TiN、(Ti, Al)N 膜の膜厚 3.0 μm と同様、切削工具用被膜として十分な厚さの (Ti, W, Si)N 系被膜が形成されていると言える。

スクラッチテストによる臨界荷重を比較すると、TiN 膜の 64N、(Ti, Al)N 膜の 73N に比べ、3 種類の (Ti, W, Si) 系被膜では、93

～132N であり、高い密着強度が得られている。3種類の(Ti、W、Si)系被膜の硬度を比較すると、(Ti、W、Si)N膜はHV3500程度であり、(Ti、Al)N膜のHV2710に比べかなり高い。

表1 (Ti、W、Si)系被膜の特性

Coating film	Thickness of coating layer [μm]	Critical load [N]	Hardness [HV _{0.025N}]
TiN	3.0	64	1940
(Ti,Al)N	3.0	73	2710
(Ti,W)N	2.6	148	1970
(Ti,W,Si)N	2.5	132	3500
(Ti,W,Si)C	3.5	93	2705
(Ti,W,Si)(C,N)	4.1	94	2670

(3) 旋削時における(Ti、W、Si)N膜の耐摩耗性

上述のことから、(Ti、W、Si)N膜は、WCを主成分とする超硬合金を母材とした場合、密着強度および被膜硬度ともに優れていることが分った。また、(Ti、W、Si)系被膜の中では、(Ti、W、Si)N膜が、切削工用具被膜として最も適していると考えられるので、(Ti、W、Si)N膜コーテッド超硬合金の工具摩耗を調べた。

被削材は、クロム鋼 SC r 420H、焼入れ焼結鋼、焼結ステンレス鋼、および焼入れ鋼 SKD11(HRC60)を使用した。

使用工用具材は、超硬合金 K10 種スローアウェイチップ(TNGA160408型)を母材とし、(Ti、W、Si)N膜をPVD法によりコーティングしたものである。比較のために、TiN、(Ti、Al)N膜も一部使用した。なお、いずれの被膜も、アークイオンプレーティング方式により形成させた。

□25×25 バイトホルダに、TNGA160408型スローアウェイチップを取付け使用した。この場合の工具形状は、-6°、-6°、6°、6°、30°、0°、0.8mmとなる。ここで、7つの数字は、前から順に、前すくい角、横すくい角、前逃げ角、横逃げ角、前切刃角、横切刃角、ノーズ半径である。また、工具切れ刃は、市販のままの状態で使用した。

切削条件としては、送り S=0.2 mm/rev、切込み a=0.1 mm と一定とし、被削材の外周旋削を行った。なお、切削速度は被削材によって変化させた。切削方式は全て乾式である。

使用旋盤は、無段変速装置付き昌運工作所製 ST5×1000型高速精密旋盤(7.5/11kW、8～2500min⁻¹)である。

(3-1) クロム鋼 SC r 420H 切削の場合

図2に、(Ti、W、Si)Nコーテッド超硬合金工具の摩耗進行を示す。比較のために TiN、(Ti、Al)N、(Ti、W)Nコーテッド超硬合金工

具の摩耗進行も示す。ここで、Vは切削速度、Sは送り、aは切込みを示す。(Ti、W、Si)Nコーテッド超硬合金工具の摩耗進行は、TiN、(Ti、Al)N、(Ti、W)Nコーテッド超硬合金工具に比べ遅くなっている。この理由として、表1に示したように(Ti、W、Si)N膜は、TiN膜、(Ti、Al)N膜、(Ti、W)N膜に比べ、密着強度および被膜硬度ともに優れているためであると考えられる。

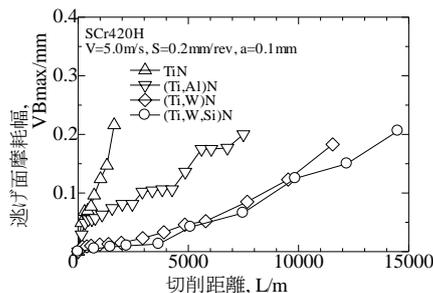
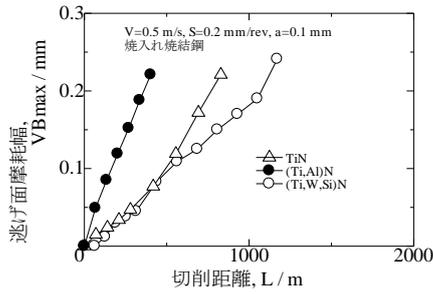


図2 クロム鋼 SC r 420H 切削時における工具の摩耗進行

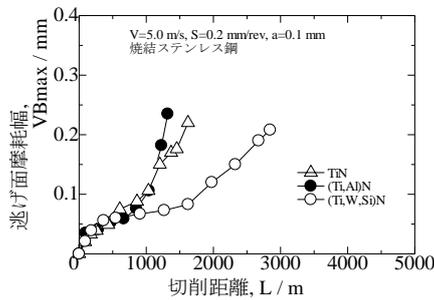
(3-2) 焼結鋼切削の場合

複雑形状の機械部品を高精度に大量生産するには粉末冶金が有効な製造技術である。焼結鋼用合金粉として使用される部分合金化粉は、完全合金化粉に比べ成形性・圧縮性に優れているため、ギヤポンプなど高強度が要求される焼結機械部品に多く使用されている。電動工用具用歯車、シンクロナイザーハブのように機械的強さ、耐摩耗性がさらに要求される場合には、焼結後、焼入れ焼戻し処理が施される。焼結機械部品は、焼結後できるだけ切削などの機械加工をしなくてすむように設計するのが望ましいが、所定の寸法公差、精度を出すために旋盤加工などの機械加工が実施される。この場合、焼結機械部品は大量に生産されるので耐摩耗性に優れ、しかも能率を高めるために高速度切削が可能な工用具材によって切削する必要がある。

次に、部分合金化粉を用いた焼結鋼を焼入れ焼戻し処理した焼入れ焼結鋼、および焼結ステンレス鋼を被削材とし、(Ti、W、Si)Nコーテッド超硬合金工具で切削し、工具の摩耗進行を調べた結果について述べる。図3にその結果を示す。図(a)に焼入れ焼結鋼(密度7.1g/cm³)、図(b)に焼結ステンレス鋼(密度6.8g/cm³)の場合を示す。なお、焼結ステンレス鋼は、センサーロータ、センサーリング、ブラケット、EPS用部品など耐食性・耐錆性が必要な機械部品に多く使用されている。



(a) 焼入れ焼結鋼の場合



(b) 焼結ステンレス鋼の場合

図3 焼結鋼切削時における工具の摩耗進行

図(a)に示す焼入れ焼結鋼切削において、いずれのコーテッド超硬合金の摩耗進行は直線的であるが、(Ti、W、Si)Nコーテッド超硬合金工具の摩耗進行が最も遅い。図(b)に示す焼結ステンレス鋼の切削においても(Ti、W、Si)Nコーテッド超硬合金の摩耗進行が最も遅い。

(3-3) 焼入れ鋼SKD11 (HRC60) の切削

図4に、焼入れ鋼切削におけるコーテッド超硬合金工具の摩耗進行を示す。通常の切削においては、逃げ面摩耗幅は切削の進行と共に次のような傾向で増加するのが普通である。すなわち、先ず急速に増加する初期摩耗があり、ついで比較的ゆるやかに定常的に増加する定常摩耗があり、逃げ面摩耗幅がある値(0.5~0.7 mm程度であることが多い)をこえると、摩耗幅が加速度的に増加していく加速摩耗となり、まもなく全く使用不能になる、という傾向を示す。本研究では、逃げ面摩耗幅が0.2 mm程度であるので、初期摩耗および定常摩耗までである。3種類のコーテッド超硬合金工具の摩耗進行を比較すると、(Ti、W、Si)Nコーテッド超硬合金工具の摩耗進行は、(Ti、Al)Nコーテッド超硬合金工具と大

差ないが、複層の(Ti、W)N/(Ti、W、Si)Nコーテッド超硬合金工具の摩耗進行が最も遅くなっており、被膜を複層化することは耐摩耗性向上に有効であることが分かる。

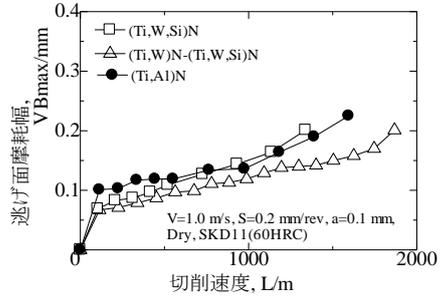


図4 焼入れ鋼切削時における工具の摩耗進行

(4) 側面切削時における(Ti、W、Si)N膜の耐摩耗性

焼入れ鋼の旋削においては、複層の(Ti、W)N/(Ti、W、Si)Nコーテッド超硬合金工具が最も有効な工具材種であったので、超硬ソリッドエンドミルにこの複層被膜をPVDコーティングし、工具摩耗を調べた。図5に側面切削の状態を示す。使用工具材は、超硬合金ソリッドエンドミルを母材とした(Ti、W)N/(Ti、W、Si)Nコーテッド超硬合金である。なお、母材は、高硬度材切削用母材である。使用マシニングセンターは、牧野フライス製横形マシニングセンターA-55(18.5/22kW、50~20000min⁻¹)である。

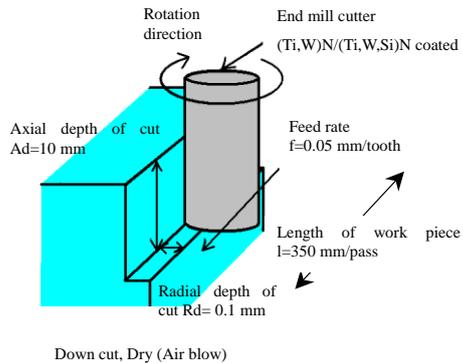


図5 エンドミルによる側面切削

図6に、切削開始から切削終了(切削長さ36.4m)までに採取した切りくずの代表例を

示す。(a)に示す切削速度が 1.67m/s の場合、工具の摩耗進行に伴い、切りくずの色は、淡黄色から褐色に変化する。これに対し、(b)に示すように切削速度を 3.33m/s に上昇させると、切りくずの色は、紫色から淡青色となり、工具摩耗の増加に連れ切削温度がかなり上昇していることが推察される。また、工具へ溶着後、切りくずが剥がれたため、短い長さの切りくずが見られる。なお、ここには示していないが、切削速度 2.5m/s の場合、きりくずの色は、(a)に示した切削速度が 1.67m/s の場合と同様、工具の摩耗進行に伴い淡黄色から褐色に変化していた。

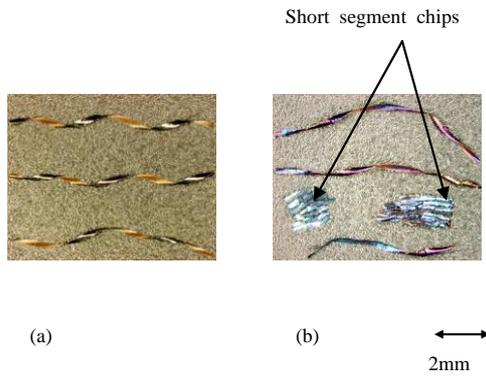


図 6 切りくず

図 7 に、切削長さ 36.4m (被削材の幅 0.35m×104 パス) におけるエンドミル切れ刃の摩耗状態を示す。なお、(a) は切削速度 1.67 m/s、(b) は切削速度 3.33 m/s の場合である。また、图中的 A 部は、コーナ付近のすくい面、B 部は、コーナ付近の逃げ面、C 部は、切込み境界付近のすくい面、D 部は、切込み境界付近の逃げ面を示す。(b)に示す切削速度 3.33m/s の場合、コーナ部に欠損が見られるが、(a)に示す切削速度 1.67m/s の場合、顕著な欠損や被膜の剥離は見られず、逃げ面摩耗が主な工具損傷である。なお、ここには示していないが、切削速度 2.5m/s の場合、工具の摩耗状態は、(a)に示した切削速度が 1.67m/s の場合と同様、顕著な欠損や被膜の剥離は見られず、逃げ面摩耗が主な工具損傷であった。

エンドミルの主な工具損傷は、逃げ面の摩耗であった。そこで、6 枚の切れ刃について逃げ面摩耗幅の最大値を測定し、この平均値を最大逃げ面摩耗幅とした。

図 8 に、最大逃げ面摩耗幅と切削長さの関係を示す。なお、切削速度は 2.5m/s の場合である。切削長さ 2.8m まで初期摩耗は大きいですが、切削長さ 2.8m 以上では切削長さの増加に連れ、最大逃げ面摩耗幅はほぼ直線的に増

加している。

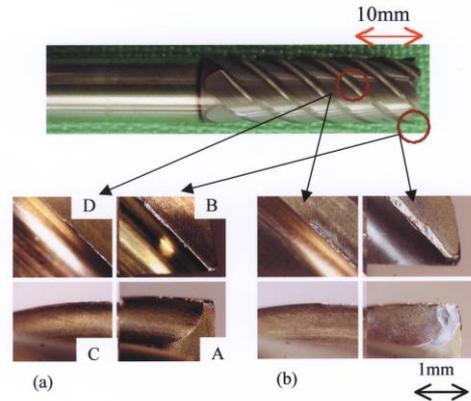


図 7 エンドミル切れ刃の摩耗状態

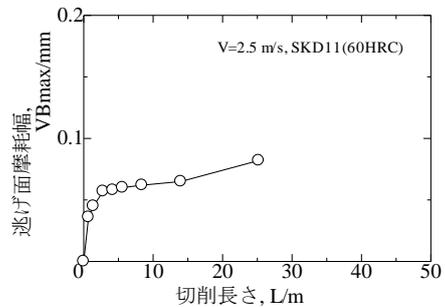


図 8 最大逃げ面摩耗幅と切削長さの関係

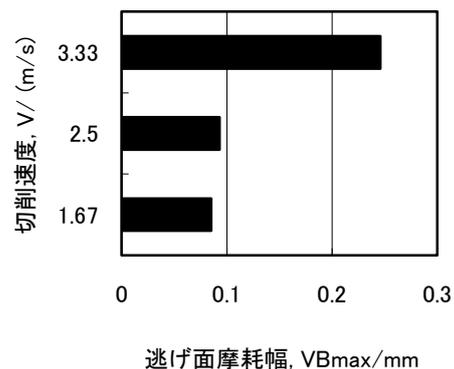


図 9 切削速度が最大逃げ面摩耗幅に及ぼす影響

図9に、切削速度が最大逃げ面摩耗幅に及ぼす影響を示す。切削長さは36.4mの場合である。切削速度が3.33m/sでは、最大逃げ面摩耗幅はかなり大きくなっている。これに対し、切削速度2.5m/sの最大逃げ面摩耗幅は切削速度1.67m/sに比べればやや大きい程度である。このため、複層の(Ti, W)N/(Ti, W, Si)Nコーテッドソリッドエンドミルは、切削速度2.5m/s以下で使用するのが望ましいと考えられる。

(5) (Ti, W, Si)系被膜の切削工具用被膜への適応について

以上の実験結果から、(Ti, W, Si)Nは切削工具用被膜として適応可能であることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

① 和田任弘、岩本晃二、焼入れ鋼切削における(Ti, W, Si)Nコーテッド超硬合金の工具摩耗、粉体および粉末冶金、第56巻、11号、pp.672-676、(2009年)、査読有。

② Tadahiro Wada、Tool Wear of Titanium-Tungsten-Silicon Based Coated Cutting Tool in Cutting Hardened Steel、Abstracts book of 4th International Conference on Surfaces Coatings and Nanostructure Materials (NanoSMat 2009)、Rome、Italy、(2009年)、査読有。

③ 和田任弘、焼結鋼切削における(Ti, W, Si)Nコーテッド超硬合金の工具摩耗粉体および粉末冶金、第55巻、12号、pp.823~826、(2008年)、査読有。

④ Tadahiro Wada and Kohji Iwamoto、Wear Characteristic of Titanium-Tungsten-Silicon Based Coated Cutting Tools、The 6th International Nanotech Symposium & Exhibition in Korea (NANO KOREA)、KINTEX、Korea、(2008年)、査読有。

⑤ 和田任弘、戸井原孝臣、(Ti, W, Si)Nコーテッド超硬合金の工具摩耗、粉体および粉末冶金、54(6)、p.405-409、(2007年)、査読有。

⑥ WADA Tadahiro、Performance of Titanium-Tungsten-Silicon-Aluminum Based Coated Cutting Tools、Material Science Forum、Vols. 561-565、p.1241-1244、(2007年)、査読有。

⑦ Tadahiro Wada、PERFORMANCE OF TITANIUM-TUNGSTEN-SILICON-ALUMINUM BASED COATED CUTTING TOOLS、The 6th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing、Jeju Island、Korea、(2007年)、査読有。

6. 研究組織

(1)研究代表者

和田 任弘 (WADA TADAHIRO)

奈良工業高等専門学校・機械工学科・教授
研究者番号：10141912