cBNおよびコーティング工具によるハードミリング：工具の耐熱性評価と小型2色温度計の開発

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 岡田, 将人 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/26706

氏　　名	岡田　将人
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第８６８号
学位授与の日付	平成１９年３月２２日
学位授与の要件	課程博士（学位規則第４条第１項）
学位授与の題目	ｃＢＮおよびコーティング工具によるハードミリング―工具の耐熱性評価と小型２色温度計の開発―
論文審査委員（主査）	上田　隆司（自然科学研究科・教授）
論文審査委員（副主査）	平尾　政利（自然科学研究科・教授），門前　亮一（自然科学研究科・教授），細川　晃（自然科学研究科・教授），浅川　直紀（自然科学研究科・助教授）

Hardmilling with cBN and coated tools

– Evaluation of heat resistance of tool and development of compact two-color pyrometer –

The cutting performance of cBN and coated tools for end milling of hardened steel is investigated. The cutting characteristics are evaluated by tool wear and temperature at the flank face, cutting force and surface roughness at the change of cutting speed, workpiece hardness and coated film material. The temperature of cutting tool is measured using a two-color pyrometer with an optical fiber. In the case of high-speed hardmilling with cBN tools, the temperature of cutting tool increases with the increase of cutting speed and workpiece hardness. In particular, the workpiece hardness has great influence on the tool flank temperature. In the case of low-speed hardmilling with coated tools, the tool flank wear becomes large using TiN and TiCN coated tools. The tool flank temperature increases with the increase of surface roughness of coated film. On the other hand, the cutting forces does not change so much with surface roughness of coated film. A compact two-color pyrometer using an optical fiber is developed for the purpose of monitoring the tool temperature in end milling. This pyrometer has a higher response of 100kHz and better S/N ratio and measures the temperature of 200°C or higher. The temperature of carbide tool during intermittent cutting of carbon steel is investigated in process with this newly developed pyrometer.

1. 緒　　言

近年，工作機械の高剛性化，高精度化の進展ならびに金型や自動車部品などに用いられる焼入れ鋼，鋳鉄，高硬度難削材などを対象としたエンドミル加工すなわちハードミリングの要求の高まりとともに，エンドミル工具に対してより過酷な条件下での耐久性が求められている．特に切削速度の高速化および工作物の高硬度化は切削温度の上昇を招き，工具摩耗を促進する．また，工具摩耗の促進は連鎖的に切削温度を上昇させ，加工精度，仕上げ面性状の劣化などの悪影響を及ぼすため，ハードミリングにおいて切削温度を把握することは非常に重要である．

工具温度の測定には従来より一般的に熱電対法が用いられているが，エンドミル加工に適用する場合，測定領域，応答速度の観点から切削ごとの工具温度を測定することは難しい．そこで，これらの問題点を解決する測定方法として光ファイバ型２色温度計がある．本温度計は，光ファイバにより対象温度場から輻射される赤外線を受光・伝送し，赤外線検出素子に照射することにより測定を行うもので，熱電対法と比較して装置が大型で汎用性には劣るが，非接触で微小な測定領域，高い応答特性を有するなど数多くの特徴を有する．

ハードミリングを可能にする工具としてcBN工具とコーティング工具がある．cBN工具は高硬度で高温強度が大きく，耐摩耗性，耐熱性，耐腐食性に優れた性能を有する．またコーティング工具は母材となる超硬合金工具の表面に硬質薄膜を単層または複数層被覆して，切削工具としての性能を高めた工具である．cBN工具に比べ高温硬度が低く高速ハードミリングには適さないが，安価で実用性が高く，切削温度が高温とならない低速領域でのハードミリング用として注目されている．

これらの観点より本研究では，ハードミリングに対するcBN工具ならびにコーティング工具の有用性について，主として耐熱性，耐摩耗性の観点から検討することを目的とし，切削速度や工作物硬さ，工具条件が工具逃げ面摩耗，工具逃げ面温度，切削抵抗，仕上げ面性状および切りくず形態に及ぼす影響を明らかにしている．また，装置が大型で取り扱いが難しい光ファイバ型２色温度計に対し，小型軽量で工作機械内への設置が簡便な実用的で汎用性を有する工具温度モニタリング用小型温度計を開発し，インプロセスで工具温度測定を行っている．

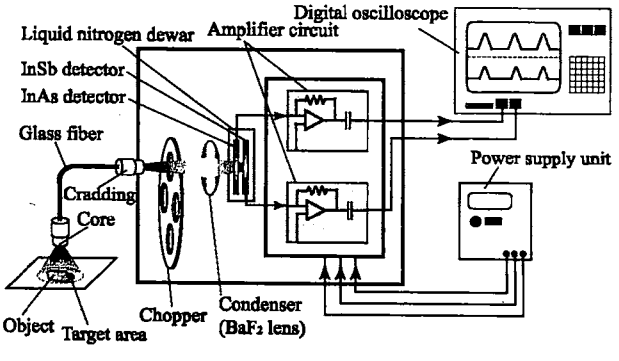

Fig.1 Structure of two-color pyrometer with an optical fiber

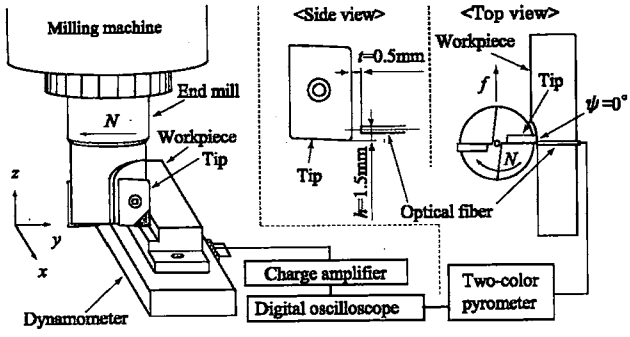

Fig.2 Experimental setup

Table 1 Experimental conditions

Cutting tool (cBN, coated tool)	Throw-away type end mill Diameter D = 25 mm Axial rake γ_a = +7°, Radial rake γ_r = −4° Tip geometry: N.L.= −15°
Workpiece	Carbon steel : JIS S55C (20HRC, 40HRC, 50HRC, 60HRC)
Cutting speed	v = 70, 100, 200, 400, 600 m/min
Feed per tooth	f = 0.05 mm/tooth
Radial depth of cut	R_d = 0.2 mm
Axial depth of cut	A_d = 3 mm
Cutting style	Down-cut without coolant

Table 2 Physical properties of cBN tools

		BN600	BN250
cBN content	%	80 ~ 90	50 ~ 60
Binder		Co	TiN
Hardness	HV	3900 ~ 4200	3200 ~ 3400
Thermal conductivity k (@ 20 / 500 / 750 / 900°C)	W/(m·K)	75.7 / 93.1 / 87.3 / 82.6	37.7 / 50.4 / 50.9 / 52.4
Thermal diffusivity α (@ 20 / 500 / 750 / 900°C)	$\times 10^{-6}$ m²/s	30.2 / 16.2 / 13.7 / 12.5	14.6 / 10.1 / 9.4 / 8.9

2. 実 験 方 法

2.1 光ファイバ型２色温度計

工具逃げ面の温度測定には，光ファイバ型２色温度計を用いた．温度計の構造を**図1**に示す．本温度計を用い，切削時に工具逃げ面からふく射される赤外線を光ファイバにより非接触で受光し，赤外線検出素子に伝送することで回転体の過渡的な温度を測定する．本温度計は分光感度特性が異なる２種類の素子からの出力比から温度を求めるため，その測定感度は測定対象物のふく射率に依存しない特徴を有している．また400kHzまでの入力に対して安定した出力が得られ，高速切削中の工具温度を計測するのに十分な応答速度を有している．

2.2 実験方法

図2に実験装置の概略を，**表1**に主な実験条件を示す．実験は，立形マシニングセンタ(CV-500A，㈱森精機製作所製)に，スローアウェイ型エンドミルを取り付けて，工作物S55Cの乾式側面加工を行い，切削抵抗と工具逃げ面温度をインプロセスで測定した．切削抵抗の測定には，圧電センサを組み込んだ３軸切削動力計を用い，チャージアンプを介してストレージスコープに出力波形を記録した．工具逃げ面温度の測定は工作物にあけた貫通穴(φ1.1 mm)に光ファイバ(コア径300 μm)を挿入し，工具回転ごとの切削終了時点における工具逃げ面温度を測定した．切削速度はcBN工具の場合にv=100~600m/minを，コーティング工具の場合に70m/minとした．測定位置は図2に示すように軸方向切り込み量(A_d=3mm)の中間となる外周刃の切れ刃先端からh=1.5mmとした．

Table 3 Physical properties of coated tools

		TiN	TiCN	TiAlN	TiAlN/AlCrN
Hardness	mgf/μm²	3745	4807	4353	5047
Surface roughness	R_z μm	0.528	0.419	0.713	0.872
Film thickness	μm	4.0	3.6	2.9	3.0
Oxidizing temperature*1	°C	600	500	800	1000

*1 : Nominal value

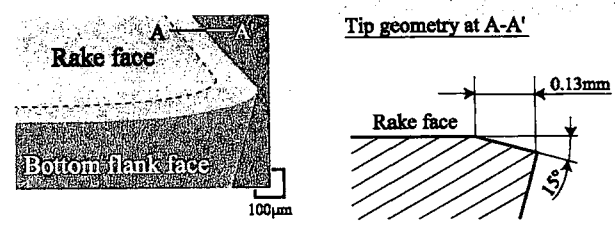

Fig.3 Form of cutting edge

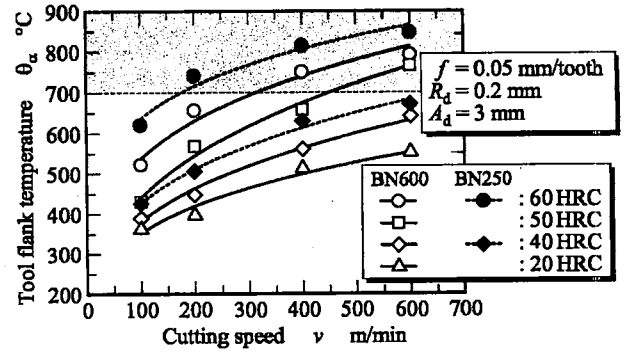

Fig.4 Relationship between cutting speed and tool flank temperature

表2，**表3**にcBN，コーティング工具の主な物性値を，**図3**に工具刃先のSEM写真と模式図をそれぞれ示す．cBN工具は，cBN含有量や結合材により，コーティング工具はコーティング膜質により，機械的および熱的特性が異なっている．また，cBN工具は超硬K20種（G10E，住友電工ハードメタル㈱）の先端にろう付けによりcBNチップが取り付けられており，コーティング工具はcBNと同じ超硬K20種ならびにP30種（P30種，住友電工ハードメタル㈱）の母材にそれぞれの膜が被覆されている．図にみるように，いずれの工具も図中の破線を境界として，それぞれ刃先周辺にネガランド−15°，ネガランド幅0.13 mmにチャンファ処理されている．そのため，本実験は負のすくい角を有する工具により切削が行われることになる．

3. 実験結果および考察

3.1 cBN工具による高速ハードミリング

図4にBN600，BN250を用いて切削したときの切削速度vと工具逃げ面温度θ_αの関係を示す．いずれの工作物硬さにおいても，vの増加とともにθ_αが上昇しており，その差は200~300°C程度となっている．本実験では，１刃当たりの送りfが一定であることから，この温度変化はvの増加によって単位時間当たりに工具に流入するエネルギーが増加したことに起因すると考えられる．工作物硬さによるθ_αをみると，BN600，v=600m/minにおいて20HRCの場合がθ_α=550°C程度であるのに対し，60HRCの場合はθ_α=780°C

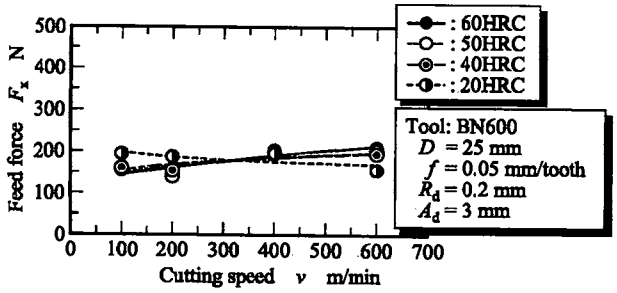

Fig.5 Relationship between cutting speed and feed force

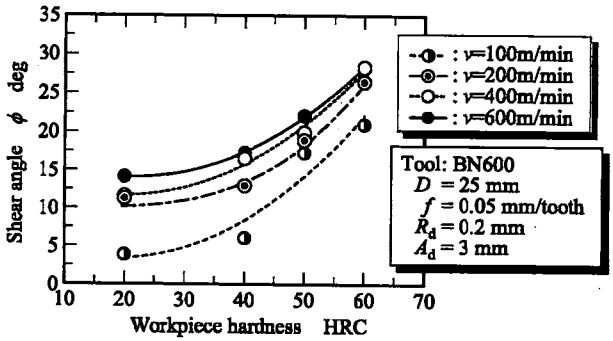

Fig.6 Relationship between workpiece hardness and simplified shear angle

にまで達しており，θ_αは工作物硬さによる影響も大きく受けることがわかる．また，それぞれの工具を比較すると，BN250のθ_αがBN600の場合より同一条件下において30~60°C程度高いことがわかる．これは，表2に示すように，BN250の熱伝導率k・熱拡散率αがBN600のそれより，いずれの温度域においても低いためと考えられる．

図5にBN600を用いた場合の切削速度vと送り分力F_xの関係を示す．いずれの硬さにおいても，150~200Nと50N程度の変化幅で推移しており，F_xがあまりvの影響を受けていないことがわかる．また，工作物硬さが上昇してもF_xはあまり増加していない．旋削加工では工作物硬さの増加により切削抵抗が増加していることから，この要因としては，工作物硬さの増加にともない切りくずの生成形態が変化して工作物と工具切れ刃の接触面積が減少し，単位時間・単位面積当たりの流入熱量が増加したのではないかと考えている．

工作物硬さが上昇しても切削抵抗があまり変化しない理由を考察するため，工作物硬さがせん断角ϕに及ぼす影響について検討する．ここでϕを検討するために切りくずの採取が必要であるが，θ_αが700°Cを超える切削条件（図4中の網掛け部）では切りくずが溶融し，排出時の形状を保った切りくず採取が困難になる．そこで，ϕの測定のための切りくず採取には，窒素雰囲気中での切削実験を行った．なお，窒素雰囲気中においても，θ_αおよび各成分の切削抵抗は大気中の場合と変化がないことを実験的に確認している．図6に工作物硬さとせん断角ϕの関係を示す．エンドミル加工の場合，切取り厚さが切削の進行とともに変化する過渡的切削過程であるため，ϕを一意的に求めることは難しいため，ここでは平均切りくず厚さから2次元切削モデルにより簡易的に求めている．図にみるように，硬さの増加によってϕが増加しており，最大で15°程度の差が生じていることがわかる．また，vの増加によってもϕが増加していることがわかり，これらの傾向は工具すくい面

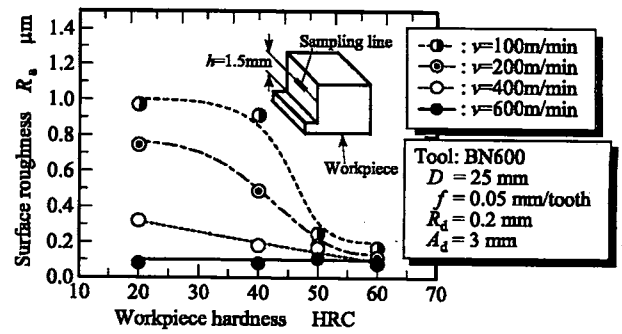

Fig.7 Relationship between cutting length and tool flank temperature

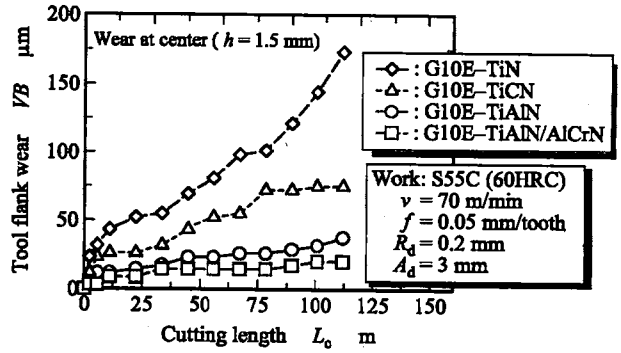

Fig.8 Relationship between cutting length and tool flank wear

温度の増加により工具すくい面と切りくずとの摩擦抵抗が減少したことなどが原因と考えられる．このことから，工作物硬さの増加によって切りくず生成形態が変化し，それによるせん断角の増加と工作物硬さによる難削性が相まって，F_xにあまり変化が生じなかったのであろう．

図7に工作物硬さと仕上げ面あらさR_aの関係を示す．図に示すように仕上げ面あらさ測定箇所は，工作物長手方向の中央付近で，外周刃の切れ刃先端よりh=1.5mmの部分で切削された仕上げ面である．v=100m/minにおいて，20HRCではR_a=0.97μm，40HRCではR_a=0.91μmであるのに対して，50HRCではR_a=0.25μm，60HRCではR_a=0.17μm程度と仕上げ面あらさが急激に小さくなる．このことから，低切削速度においてはcBN工具は高硬度材料ほど優れた切れ味を発揮するといえる．一方，v=600m/minではR_aは工作物硬さによらずR_a=0.08μm程度であり，高切削速度では工作物硬さが仕上げ面あらさに及ぼす影響は小さいことがわかる．

3.2 コーティング工具による低速ハードミリング

図8にG10Eを母材とする4種類のコーティング工具を用いて切削したときの切削距離L_cと工具逃げ面摩耗幅VBの関係を示す．ここで，VBとは，工具逃げ面温度測定部であるh=1.5mmの部分において，均一な摩耗部の最大摩耗幅と定義した．また，L_cとは切削時に切れ刃が工作物と接触した実長さを示す．いずれの膜質においてもL_cの増加によりVBが増加しているが，その大きさは膜質により大きく異なり，L_c=112mにおいてTiNがVB=170μmであるのに対し，TiAlN/AlCrNはVB=20μmと，その差は約150μmにもなる．一般的に工具の耐摩耗性は高温硬度に依存するとされており，VBの進行傾向に膜質による大きな差が認められたのは，コーティング膜の硬度と酸化開始温度が関係していると考えられる．

図9は図8におけるL_cとθ_αの関係を示したものである．TiAlN/AlCrNの場合を除き，L_cの増加とともにθ_αが上昇し

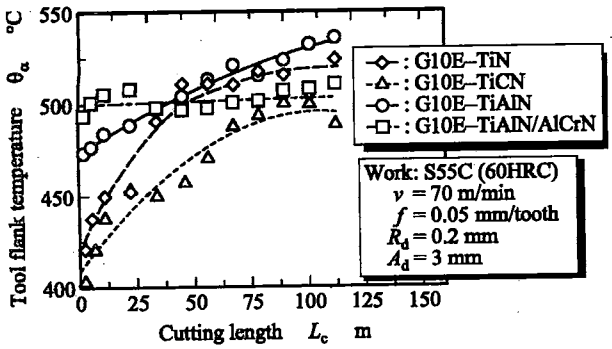

Fig.9 Relationship between cutting length and tool flank temperature

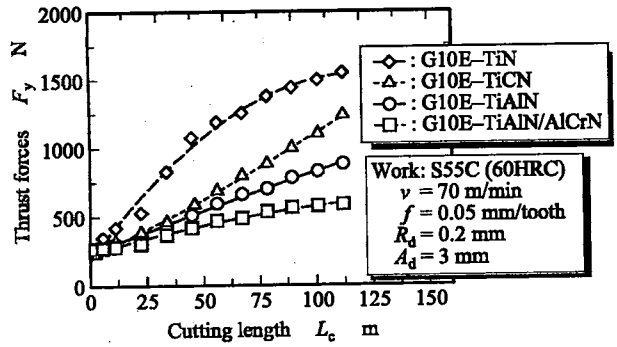

Fig.10 Relationship between cutting length and thrust force

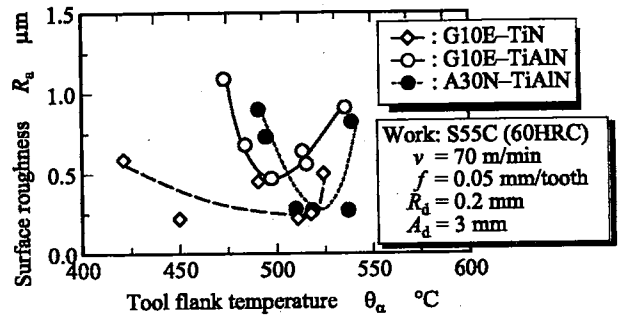

Fig.11 Relationship between tool flank temperature and surface roughness

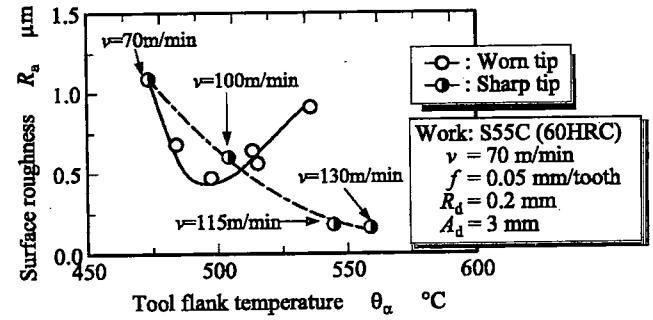

Fig.12 Influence of cutting edge form on surface roughness

ており，TiNの場合，最大でその差は100°C程度となっている．L_cによる影響はVBの進行による影響を示すことから，それぞれの膜質の温度上昇の違いはVBの進行による影響と考えられる．またL_cが進行していない初期のθ_αはTiCNが約400°Cであるのに対し，TiAlN/AlCrNは約500°Cと大きな差が認められる．これは，コーティング膜の表面あらさが影響していると考えられる．工具表面あらさは，その工具の摺動特性を表し 表面あらさが大きいと切削時の工具すくい面と切りくず間ならびに工具逃げ面と仕上げ面間で生じる摩擦熱も大きくなる．そのため，それぞれの膜質の表面あらさの影響が顕著にθ_αに反映されたと考えられる．なお，ここでTiCNのθ_αをみると，L_cの進行とともにθ_αが最大で約500°Cに達していることがわかる．TiCNの酸化開始温度は約500°Cであり，切削中のTiCNが酸化開始温度付近の環境下にあったことがわかり，図8に示すようにTiCNは比較的高硬度であるにも関わらずVBが大きい原因と考えられる．

図10は図8における背分力F_yを示したものである．いずれの膜質においても，L_cの増加にともないF_yが増加していることがわかり，TiNの場合，L_c=1.12mにおいて約250Nであるのに対し，L_c=112mになると約1500Nまで上昇している．F_yの増加は，VBの進行により工具刃先が鈍化し，切削に要するエネルギーが増大したことに起因すると考えられ，これが前述したθ_αのL_cによる増加に直接的に関係すると考えられる．また，VBが進行していない初期のF_yをみると，いずれの膜質においてもほぼ同じであることがわかる．F_yは切削パルス毎の最大値で，工具食いつきによる衝撃の影響を反映した値である．前述の通り初期のθ_αに膜質による大きな違いが認められたのは，コーティング膜の表面あらさによると考えられ，これらの影響は工具食い付き時の切削抵抗には反映されない．そのため，初期のF_yに膜質による大きな違いは認められないと考えられる．

図11にG10E-TiN，TiAlN，A30N-TiAlNで切削を行った場合のθ_αと仕上げ面あらさR_aの関係を示す．図よりいずれの膜質においてもθ_α=500~530°Cにおいて減少から増加傾向に転じる変極点をなしていることがわかる．一般的に構成刃先はすくい面温度が工作物の再結晶温度以上になると消失するとされており，θ_αが500°C以下の領域における仕上げ面あらさの減少は構成刃先もしくはこれに類する凝着現象の消失により表面性状が向上したためと考えられる．

図12に未摩耗のG10E-TiAlNを用いて，切削速度vを高速にすることによりθ_αを変化させた場合のθ_αとR_aの関係を図11の同工具の結果と併せて示す．図より，vを変えた場合のR_aはθ_αの上昇とともに減少していることから，図115中のθ_α=500~530°C以降のR_aの増加はθ_αによる影響でなく，VBの進行による工具形状の変化が影響していると考えられる．

4. 工具温度モニタリング用小型温度計の開発

本研究において用いた光ファイバ型２色温度計（以後，液体窒素冷却型；LN-typeと称する）は，赤外線検出素子を液体窒素で冷却する必要があるため，センサが大型で使用時の姿勢が制限されるなどの実用的な問題点が多い．そこで本章では，実用性と汎用性を考慮した工具温度モニタリング用小型温度計（以後，小型温度計；EL-typeと称する）の開発を目的とする．

図13に小型温度計の模式図を示す．本温度計は光ファイバ，赤外線検出素子，出力増幅回路から構成される．測定対象物からの赤外線が光ファイバに入射すると，ファイバ内を伝送し，検出窓を通して２色素子に照射される．これにより２色素子から得られた電気信号を増幅回路により

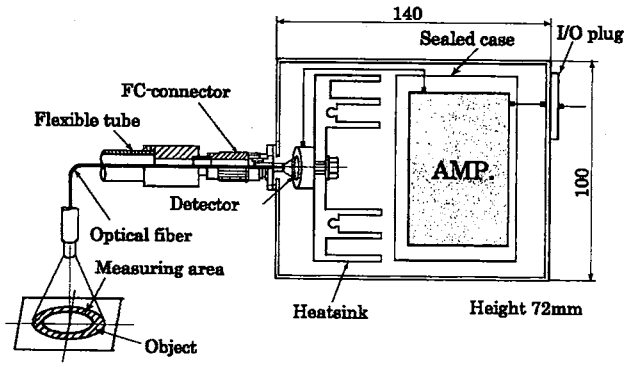

Fig.13 Fundamental structure of compact two-color pyrometer

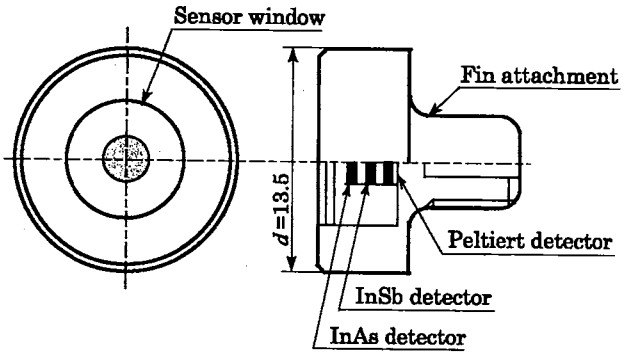

Fig.14 Schematic illustration of two-color detector

増幅し出力する．なお，光ファイバはステンレス製フレキシブルチューブにより保護し，検出素子側は光軸合わせのためにFCコネクタにより本体と接続する．

図14に赤外線検出素子の構造を示す．図に示すように，本検出素子はInSb素子にInAs素子を同一光軸上で積層させた構造をしており，内蔵されたペルチェ素子とサーミスタにより電気的に−60°Cで一定に冷却されている．これにより，液体窒素などの冷却媒体を必要とせず，温度計の小型・軽量化が可能となり，測定方法や取り扱いが飛躍的に簡便となる．

図15に超硬P30種（A30N，住友電工ハードメタル㈱）によりS45Cの工作物を切削した場合の切削速度vと工具逃げ面温度θ_αの関係を液体窒素冷却型で測定した場合と併せて示す．ここで，工具逃げ面温度測定位置は切削終了点から90°回転後(ψ=90°)である．両者の測定値はいずれのvにおいてもほぼ同じ値を示していることがわかり，小型温度計が従来型に匹敵する性能を有しているといえる．

図16に切削距離L_cと小型温度計を用いてインプロセスで測定したθ_αならびに工具逃げ面摩耗幅VBの関係を示す．初期摩耗を除き，θ_αが摩耗進行の傾向をよく表していることがわかる．このことから，小型温度計を用いることによりインプロセスで工具損耗状況をモニタリングすることが可能であることがわかる．

5. 結　　言

cBNおよびコーティング工具を用いて焼入れ鋼のハードミリングを行い，切削条件や工具条件が工具逃げ面摩耗，工具逃げ面温度，切削抵抗ならびに仕上げ面性状に及ぼす影響について検討した．以下にその結果をまとめる．

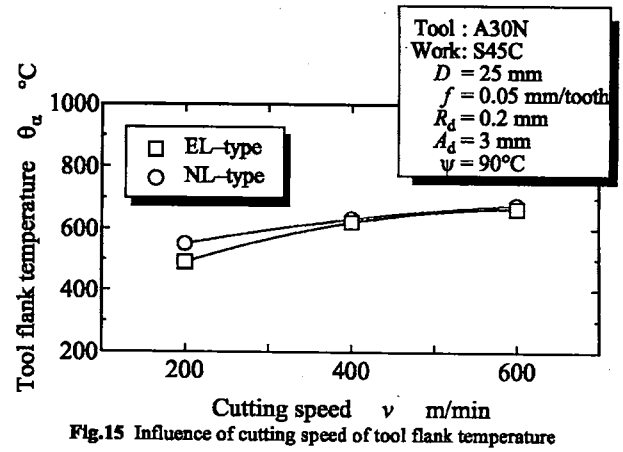

Fig.15 Influence of cutting speed of tool flank temperature

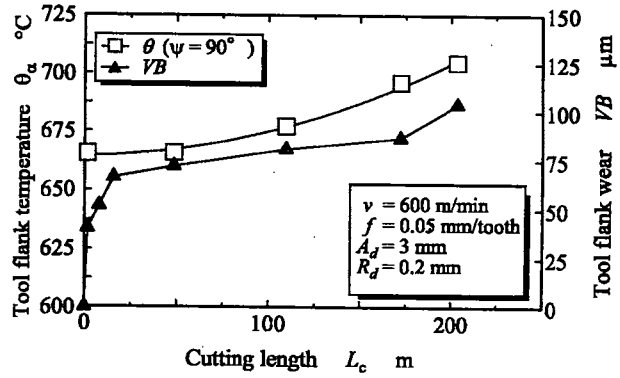

Fig.16 Influence of cutting lenth on tool flank temperature and wear

(1) cBN工具を高速ハードミリングに適用した場合，工具逃げ面温度は切削速度，工作物硬さの増加にともない増加するが，送り分力は大きな影響を受けない．また，仕上げ面あらさは高硬度材であるほど良好な表面性状を示す．

(2) コーティング工具を低速ハードミリングに適用した場合，硬度ならびに酸化開始温度が高いコーティング工具ほど良好な耐逃げ面摩耗性能が得られた．また，工具逃げ面温度は工具表面のあらさに顕著に影響を受ける．仕上げ面あらさは工具逃げ面温度が高く，工具逃げ面摩耗が大きい場合に増加する．

(3) 電子冷却型の検出素子の導入ならびに光ファイバをステンレス製チューブとFCコネクタにより保護することにより，従来の液体窒素冷却型温度計に対し，実用的に使用可能な小型温度計の開発に成功した．これにより従来型と同程度の性能を有したインプロセスでの工具温度モニタリングが可能となった．

学位論文審査結果の要旨

当該学位論文に関し，平成19年1月30日に第1回学位論文審査会を開催し，提出された学位論文および関連資料について詳細に検討した．更に，平成19年2月1日の口頭発表後，第2回審査委員会を開催し，慎重に協議した結果，以下の通り判定した．

本論文は，ハードミリングに対するcBNならびにコーティング工具の有効性について，耐熱性，耐摩耗性の観点から検討し，切削速度・工作物硬さが工具温度・逃げ面摩耗・切削抵抗・仕上げ面性状・切りくず形態に及ぼす影響について詳細に検討している．cBN工具を用いた硬度60HRCの焼入れ鋼の高速エンドミル加工では，工具逃げ面温度は850℃まで上昇し，cBN工具が過酷な熱環境に耐えうることを示している．各種コーティングを施した工具では，膜の耐熱性が高いTiAlN/AlCrNコーティング工具の逃げ面摩耗が最も小さく，膜面の粗さが小さいTiCNコーティング工具の逃げ面温度が低いことをみいだしている．さらに，新しい工具温度計の開発も行い，液体窒素に代わってペルチェ素子により電気的に素子を冷却する方式を採用することで，温度計の小型化，操作性の飛躍的な向上に成功し，工具損耗状態をインプロセスで監視できるシステムを新たに構築している．

以上のように，本論文は工学の分野に対する貢献度が高く，また学術的価値が高いと評価でき，その内容は博士（工学）論文に値すると判定する．