



Title	大型工作機械におけるマルチセンサ融合型加工・計測システムに関する研究
Author(s)	上北, 将広
Citation	大阪大学, 2017, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/61721
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

博士学位論文

大型工作機械におけるマルチセンサ融合型
加工・計測システムに関する研究

上北 将広

2017年1月

大阪大学大学院工学研究科

目 次

第1章 緒論	1
1.1 研究の背景とねらい	1
1.2 研究の目的	5
1.2.1 切削加工における動的特性の監視技術	5
1.2.2 切削加工における工具と加工表面性状の監視技術	7
1.2.3 大型精密部品のオンマシン計測技術	10
1.2.4 加工・計測システムの統合管理	12
1.3 本論文の構成	14
参考文献	15
第2章 加工・計測システムの大型精密部品への展開戦略	23
2.1 緒言	23
2.2 技術水準と展開戦略	23
2.3 蒸気タービン発電機の製造工程における検証.....	29
2.4 結言	31
参考文献	32
第3章 時間周波数解析によるインプロセスびびり振動検知	35
3.1 緒言	35
3.2 精密ドリル加工	36

3.2.1	びびり振動のモデル	36
3.2.2	蒸気タービンロータの穴あけ工程	38
3.3	加工監視システムの信号処理	39
3.4	製造プロセスにおけるびびり振動検知特性の検証	42
3.4.1	システム構成と実験条件	42
3.4.2	工具状態遷移の評価	43
3.5	考察	47
3.6	結言	48
	参考文献	48
	第4章 工具摩耗・加工表面性状のマルチセンサ融合型異常検知	51
4.1	緒言	51
4.2	マルチセンサ融合型加工監視システム	51
4.2.1	精密切削と AE	51
4.2.2	異常検知における閾値	53
4.3	工具と工作物	54
4.3.1	工具材質と加工プロセス	54
4.3.2	蒸気タービンロータの溝入れ工程	54
4.4	マルチセンサ融合による基礎実験	55
4.4.1	工具寿命の実験	55

4.4.2	工具摩耗・加工表面性状の異常検知	59
4.5	製造プロセスにおける異常検知特性の検証.....	60
4.5.1	実験条件	60
4.5.2	検証結果	62
4.6	考察	63
4.7	結言	65
	参考文献	66
	第 5 章 大型工作機械の空間補正によるオンマシン寸法計測	69
5.1	緒言	69
5.2	大型精密部品の寸法計測の要件	69
5.2.1	計測精度と汎用性	69
5.2.2	オンマシン寸法計測の対象選定	72
5.3	大型精密部品のオンマシン計測システム	72
5.3.1	工作物の特徴と寸法公差	72
5.3.2	システムの主な要素	73
5.3.2.1	長さ計測系と測長軸のアライメント	74
5.3.2.2	位置決めとプロービング	75
5.3.2.3	絶対長さの校正の仕組み	75
5.3.2.4	空間誤差の考慮	75

5.4 長さ計測の検証実験	78
5.4.1 回転対称体の旋削工程	78
5.4.2 回転対称体の寸法計測実験	79
5.4.2.1 長さ計測装置	79
5.4.2.2 プローブと校正用アーティファクト	81
5.4.2.3 計測手順	82
5.4.3 結果と考察	82
5.5 空間補正の検証実験	85
5.5.1 工作物の設置誤差の影響	85
5.5.2 空間誤差のオフライン計測実験	86
5.5.3 真直度のオンマシン計測実験	87
5.5.4 結果と考察	89
5.6 結言	90
参考文献	90
第 6 章 結論	93
研究業績	95
謝辞	96

第1章 緒論

1.1 研究の背景とねらい

大型構造物の製造技術は、社会基盤の持続的な発展に不可欠である。近年では、火力および原子力発電、再生可能エネルギー、航空宇宙、鉄道、造船、先端エネルギー研究施設などの分野で成長が見込まれており、大型かつ精密な部品への需要が高まっている[1]。工作機械を用いた機械加工は、素形材に対して付加価値を与え所望の機能を満たすために、最も重要な工程のひとつと考えられる。金属材料の精密除去加工を目的とした工作機械の歴史は長く、1700年ごろの欧州の機械式時計の工房では歯車製造用のフライス盤が使用されていた[2]。その後、産業革命期の動力源の進歩によって大型部品の製造が実用化され、1950年代以降の CNC (Computer numerical control) による技術革新が自動化を促進し現在に至っている。Taniguchi は1983年に精密加工の精度の変遷と展望をまとめている[3]。1950年代は約 $10\text{ }\mu\text{m}$ の加工精度であったが、可干渉性が高いレーザ光の発明と、それを応用した精密計測・位置決め技術[4]により、1990年代には 1 nm の制御分解能が実現された。

精密加工・計測における技術体系が構築される一方で、大型部品向け工作機械に関しては、学術研究を遂行する際の難しさを含んでいた。Uriarte ら[1]はこの要因として、産業界では一品一様の大型部品の問題を短期に解決することが優先され、現場固有の改善にとどまる傾向にあったことを指摘している。しかしながら、大型精密部品を合理的に製造するための包括的な体系は、今後必要になると考えられる。関連した取り組みとして、2014年に CIRP Annals で報告された ‘Design and management of manufacturing systems for production quality’ が挙げられる。高度にシステム化された現代の工場において、付加価値の高い多品種少量生産を実現するための戦略および技術的要素がまとめられ、将来に進むべき方向性がプロダクション・クオリティの枠組みとして提示された[5]。大量生産品を対象とした従来の統計的品質管理では、高度にカスタマイズされた少量生産品で強い制約を受ける。例えば、大型精密部品では生産品質に関する多数の要件をすべて満たして良品が成立するうえ、予備部品がなく修復も困難であるため、不良が発生した際の損失が甚大である。したがって、このような課題を解決する技術革新が求められている。前述の文献[5]では、Fig. 1-1 に示す 8 項目の具現化のための先進技術 (Advanced technological enablers) が挙げられ、近年の計算機性能の向上とさまざまな「物」に関わる相互情報通信の発展が製造業に変革をもたらすことが期待されている。しかしながら、大型精密部品の製造における工具・工作物・工作機械、およびプロセスの特性を考慮し、合理的に生産品質を保証する枠組みを構築した事例はみられていない。以上の背景から、工作機械に関する加工・計測の要素技術の高度化・システム化と、システム間の連携・管理体制の強化が、次世代の競争力の基盤になると考えられる。

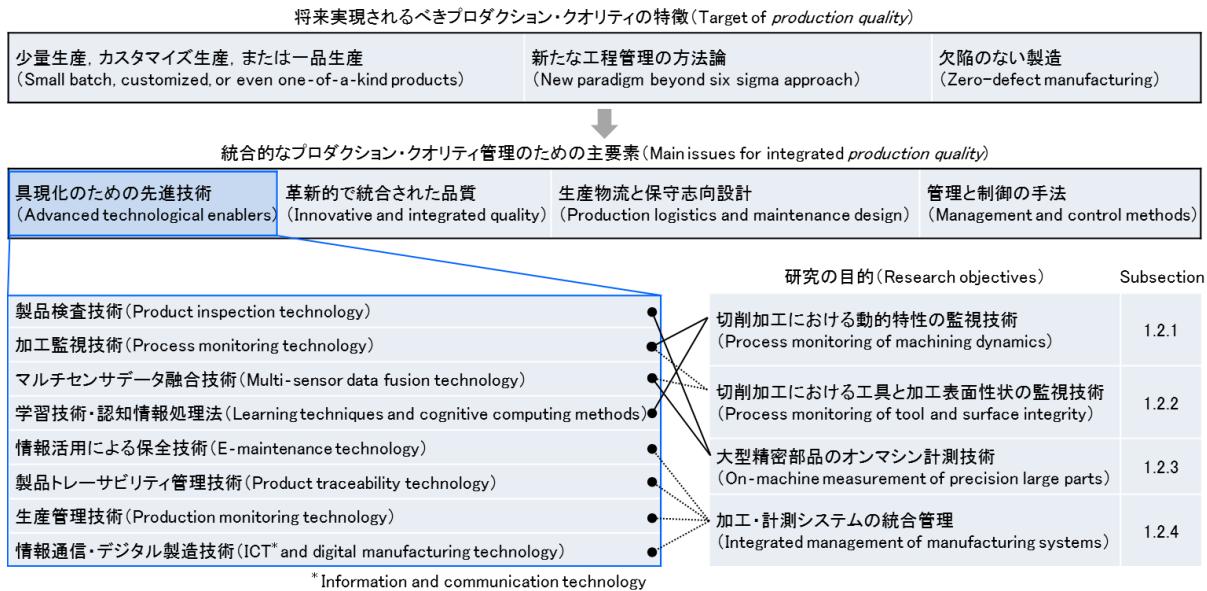


Fig. 1-1 Overview of *production quality*.

ここで、精密加工システムの構成要素から出発し、本論文で取り扱う課題を述べる。工具・工作物・工作機械からなるシステムの共通課題に対し、今日の大型部品の製造で考慮すべき問題、さらには将来の欠陥のない製造 (Zero-defect manufacturing) の実現に向けた主要な戦略の関係を Fig. 1-2 に表した。図中には示されないが、工具・工作物・工作機械の各要素も多様な研究課題から構成される。例えば、工具では高能率・長寿命化のために幾何形状、材種、コーティング、ホルダ構造の検討が必要であるし、工作機械では高精度・高能率化のための課題として、機械構造、送り機構、位置決め方法、熱変位などが挙げられる。一方で、本論文では主要な 3 つの要素と密接な結びつきをもつ境界領域の課題に着目する。これらは生産品質に対し、より直接的に影響すると考えられ、Fig. 1-2 では要素間における代表的な 3 つの相互作用を、模式的に輪帯で表している。第 1 に、境界領域を示す最内周の帯は、切削加工の動的特性 (Cutting dynamics) の因子を表している。動的特性に関して考慮すべき項目として、工具や工作物の把持・拘束状態などが挙げられるが、現象の予測がより難しい、工具と工作物の相互作用による振動現象が最も重要である。第 2 に、その外側の帯はプロセス制御 (Process control) に関する課題を示している。工具と工作物の間に位置する加工表面性状の生成現象に加え、工作機械による工具状態の監視が生産品質保証の要点となる。第 1 と第 2 の課題群に対する解決策として、加工監視 (Process monitoring) の枠組みが効果的と考えられる。第 3 に、工作物の寸法計測 (Dimensional measurement) を取り上げる。工作物と工作機械の境界領域において、合理的な製品検査を実現するオンマシン計測 (On-machine measurement) が不可欠と考えられる。大型部品を取り扱う場合は、さらに 3 つ輪帯の外側を囲う阻害要因が加わり、生産品質保証に関する問題が複雑化することに配慮しなければならない。

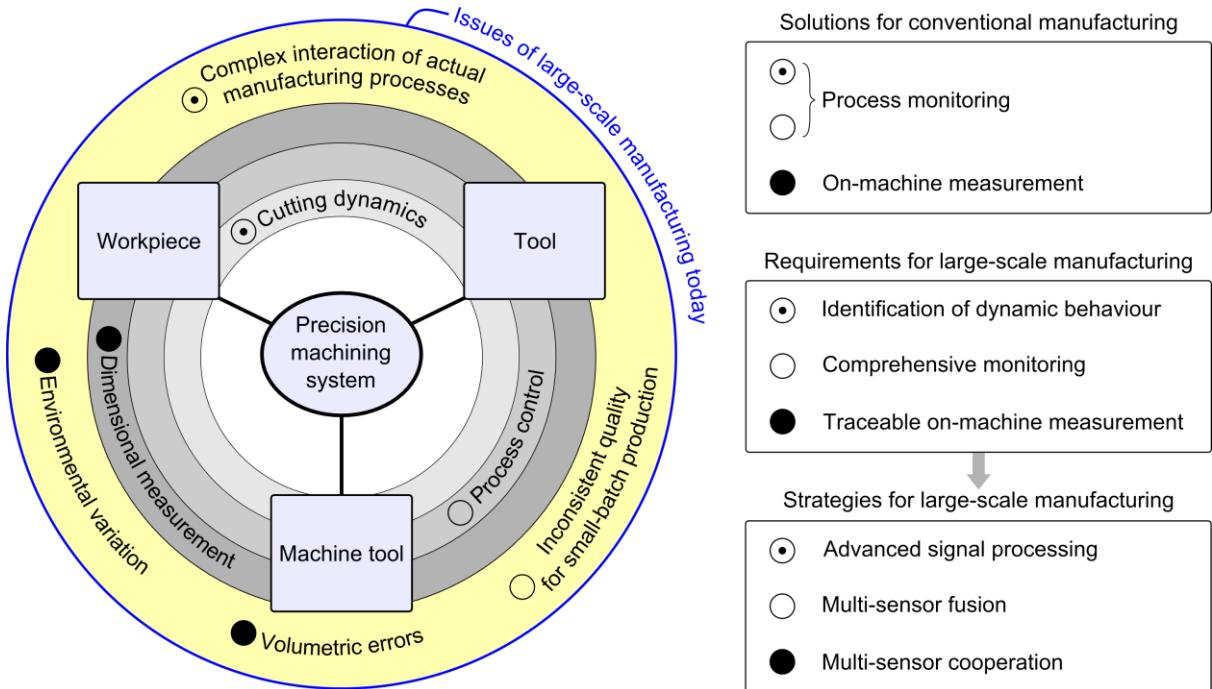


Fig. 1-2 Issues and strategies of precision large-scale manufacturing.

つまり、大型精密部品の生産品質を総合的に保証するための独自の方法論が求められる。例えば、第 1 の動的特性では実際のプロセスで現れる複雑な相互作用を想定した加工監視が必要であり、第 2 のプロセス制御に関しては、多品種少量生産品のプロセス条件に関わる不整合を防止する、包括的な加工監視が求められる。膨大な時間を要する大型精密部品の切削プロセスにおいて、異常を未然に防ぐ加工監視システムの新たな枠組みが必須であると考えられる。さらに、第 3 の寸法計測においては、大型工作機械の空間的な位置決め誤差 (Volumetric errors) だけでなく、システムが設置される環境の変動要因 (Environmental variation) も考慮する必要がある。このような条件下で高精度な計測を実現するためには、新たな概念に基づいたトレーサブルなオンマシン計測システムの構築が必要である。これらの背景を考慮し、本研究では加工監視に関する戦略として、先端的信号処理法 (Advanced signal processing) およびマルチセンサ融合 (Multi-sensor fusion)を考え、オンマシン計測の戦略として、マルチセンサ協調 (Multi-sensor cooperation) を掲げる。これらの戦略に基づいて構築されたシステムにより、プロセスおよび加工結果にトレーサビリティをもたらすとともに、工具・工作物・工作機械に関する情報がインプロセス・オンマシンで有機的に繋がることで、総合的な生産品質が保証される姿を目指す。

以降ではまず、加工監視システムに関して、周辺研究の経緯を具体的に述べていく。前述のように、工作機械でナノメートルオーダの位置決め分解能が達成され、原子単位に至る除去加工プロセスも検証されてきた[6][7]。しかしながら、機械加工が行われる工作機械において、工具と工作物の間で実際に起こっている現象を直接的または間接的にその場で観測し、プロセス制御に適時に反映させる加工監視に関しては、一般に行われ

る切削に対しても発展の途上である[8]. これは切削の力学的側面ひとつをとっても、局所的かつ急激なせん断変形がきわめて短時間で生じる[9]複雑な現象であることによる. しかしながら、生産品質を確保するために加工監視の位置付けはますます重要になるものと考えられる. そこで、加工監視技術の歴史的背景と現在までに明らかになっている項目を概観したのち、1.2における詳細の研究目的の議論に移る.

金属材料の除去加工の監視技術に関しては、1976 年の Micheletti らの切削時の工具摩耗の研究[10]にはじまり、1983 年には Tlusty らによって切削に関する物理量を検知するセンサ群、および幾何形状を計測する手段を備えた無人運転化の構想が提示された[11]。切削抵抗、主軸負荷、AE (Acoustic emission) などの変動量を計測する加工監視と、接触子を用いたオンマシン寸法計測を組み合わせ、プロセスや工作物の品質を管理する思想は、現在に至るまで共通する考え方である。1995 年には Byrne らのグループによる調査結果が、工具状態監視 (Tool condition monitoring ; TCM) としてまとめられた[12]。当時の TCM の研究動向を Table 1-1 に示す。センサの利用目的に関しては、この時代までに現在とほぼ同様の考え方方が整理されている。その後の計算機の処理能力の向上によって、実用上のシステム化が注力領域となり、2010 年には TCM における信号処理法や意思決定戦略の応用例が総括されている[13]。大型精密部品においては、切削プロセスに関する生産品質保証に高い需要がある反面、加工監視システムの検証事例は少ない。Table 1-1 の切削プロセスに関する問題を整理すると、びびり振動 (Chatter)、加工表面性状、切屑形態、工具摩耗、工具破損などが主な項目となっている。前述のとおり、これらは大型精密部品の製造においてさらに複合的な問題となる可能性が考えられる。そこで、切削加工の阻害要因として、びびり振動に代表される動的特性に関する問題を 1.2.1 で、工具および加工表面の状態監視に関する問題を 1.2.2 で議論していく。

Table 1-1 Sensor research for tool and process monitoring in machining [12].

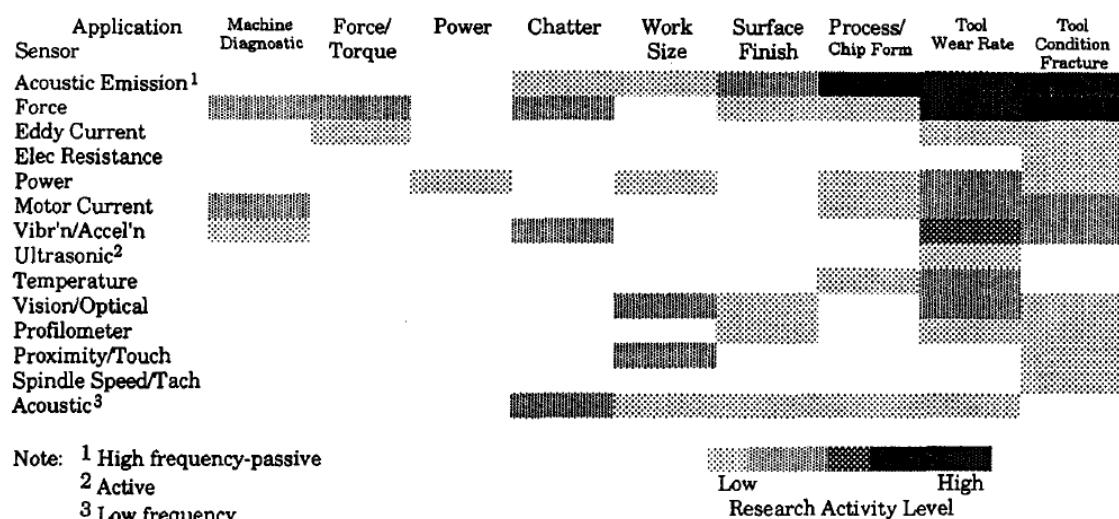




Fig. 1-3 Machine tools for large parts [1], (a) movable column, (b) gantry, (c) elevated gantry, and (d) large wing skin machining on a dual spindle gantry.

また、加工寸法をオンマシンで計測する手法に関しては、大型精密部品に要求される精度と計測不確かさを考慮し、大型工作機械に特有の位置決め誤差を扱う必要がある。Fig. 1-3 に大型工作機械の例を示す。Uriarte ら[1]は、通常の工作機械と大型部品向け工作機械の成り立ちの違いや、位置決め・加工精度に影響する因子を整理し、高付加価値の大型部品を成立させるためには、誤差の評価・補正技術が必須であることを指摘した。さらに、継続的に取り組むべき重要課題として、およそ 5~50 m の寸法に対する高速かつトレーサブルな計測技術が挙げられている。しかしながら、周囲環境が変動する条件下におけるその場での寸法計測など、製造現場で運用するうえで不可欠と考えられる要素に関しては、実験室内の基礎的な事例にとどまり[14] [15]、実用性と汎用性を両立するシステムに対して、さらなる研究が求められている。高価な素形材に対する誤加工時の損失を考慮すると、大型精密部品に適したトレーサブルな計測システムを構築することは、産業上の需要が非常に高いと考えられる。以上の背景を踏まえ、1.2.3 で幾何形状のオンマシン計測に関する目的を明らかにする。さらに、1.2.4 では加工・計測の要素技術を製造システムとして総合的に活用する際に留意すべき項目にふれる。

1.2 研究の目的

1.2.1 切削加工における動的特性の監視技術

切削に関わる動的特性の問題のなかでも、びびり振動は古くから効率化を阻害する現象として認識されていた[16]。特に工作物または工具の剛性が低い場合はプロセスが不安定状態に陥りやすく、加工面に周期模様として現れるほか、品質に影響のある損傷を引き起こす可能性がある。びびりは強制びびりと自励びびりに大別されるが、大型精密部品の品質の観点からは、切削抵抗が小さい状態でも発生しうる、自励びびりへの対策が求められる。自励びびり振動は 1960 年代には 2 次元切削を対象とした定式化がなされ[16]、Fig. 1-4 に示すように、1 回転前と現在の振動変位との差から生まれる再生効果のモデルにより、時間遅れを伴う閉ループ系の安定性問題として扱われた。以降、ミーリングなどのより複雑な幾何形状を対象とした再生びびりの安定性解析が行われた[17][18]が、1995 年に Altintas ら[19]が提案したミーリングにおける單一周波数解法 (Single frequency solution) によって計算負荷が低減されたことで応用範囲が広がり、プロセス異常の解決

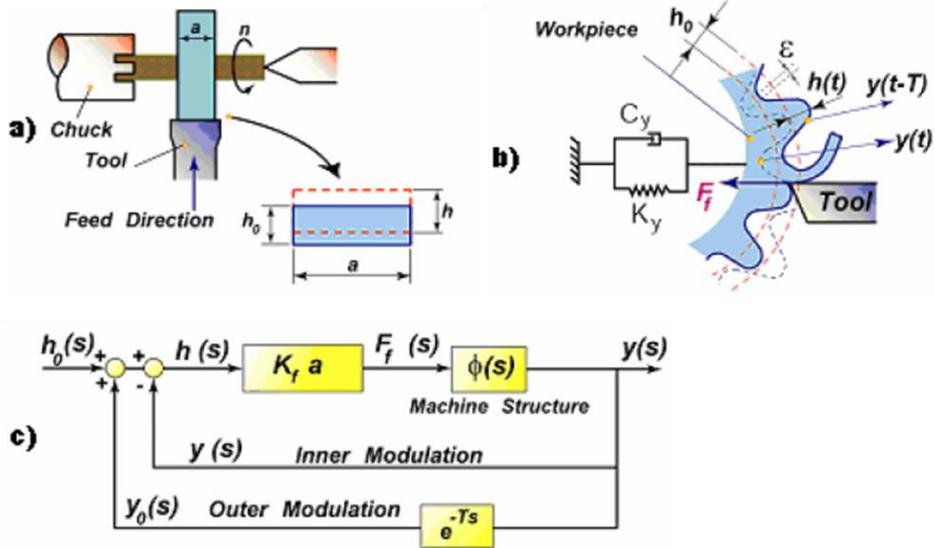


Fig. 1-4 Dynamics of orthogonal cutting system [16] (quoted in [20]).

や高効率な条件の探索に用いられてきた[20][21]. 現在までにミーリングに加え, 旋削[22], ボーリング[23], ドリル加工[24]に対する体系的な理論の整理と, 実験的検討が広く行われている. さらに, 安定性の改善に寄与する不等ピッチ工具[25], 減衰機構によるびびり抑制[26]など, 生産性の向上のために積極的に活用した事例が報告されている.

びびり振動の発生に関しては, 安定とみられる加工条件でプロセスを継続した場合でも, 工具摩耗の影響により切削抵抗が増加し, 不安定状態に遷移する現象がみられる[27]. 時間領域解析の発展により, 新規工具と摩耗工具に対するびびり振動特性の比較検証などが行われるようになった[28]. しかしながら, 動的安定性の理論モデルのみでは, さまざまな加工条件が混在する製造現場で効果的な活用が難しい状況もみられた[21]. 品質を保証する観点では, びびりを発生直後に捉え, 振幅が増大しない段階でプロセスを停止し, 工具や工作機械の損傷などの影響を最小限に留める技術がより重要である. このような背景からインプロセスのびびり検知法が求められており[29][30], 切削現象の動的な情報を含む信号の実時間処理によって, びびりの起点や振動エネルギーを正確に評価する技術に注目が集まっている[31]. Quintana と Ciurana による近年のびびり研究の総括[21]においても, インプロセスのびびり検知は注目すべき研究課題群のひとつとして位置付けられており, びびりと関連性が高い信号の取得方法, および効率的な信号処理アルゴリズムの重要性が指摘されている. これまで, 加速度センサや変位センサで取得した時系列に対して, 高速フーリエ変換 (Fast Fourier transform ; FFT) により得られた周波数スペクトルの特定の帯域のエネルギー (Frequency-band energy) を監視する方法[32], ウェーブレット変換 (Wavelet transform ; WT) による展開係数を追跡する方法[33]などが提案された. これらは, あらかじめびびりの周波数を把握している場合に有効である. さらに, 周波数が時間変化する信号に対しては, 時間周波数解析[34], 学習によるパターン認識[35], 情報エントロピー法[36]などの信号処理アルゴリズムを用いた加工状態の推定法が提

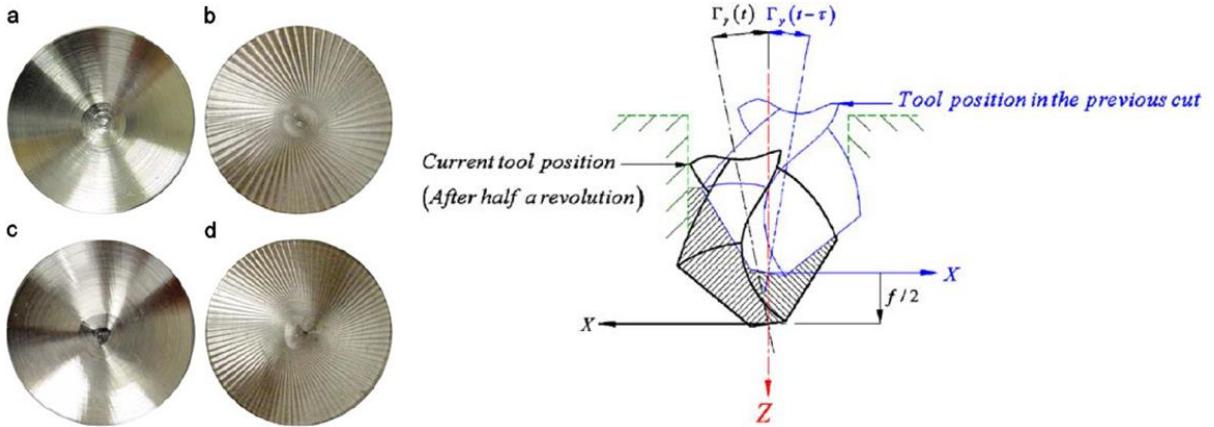


Fig. 1-5 Hole shapes resulting from drilling blind holes (left) [24]: (a) stable cut, (b) sunray pattern due to torsional-axial chatter vibration, (c) trigon caused by whirling vibrations and (d) surface resulting from chatter and whirling vibration. Regeneration effect in bending vibration (right) [39].

案されており、事前にびびり周波数に対する情報がない場合も対応できる。加工対象としては、ミーリングや旋削のほか、ボーリング[37]やドリル加工[38]が報告されている。

大型精密部品に多く用いられ、特に高度な品質管理が求められるドリル加工に対しても、Fig. 1-5 に示すような動的特性の影響が現れる可能性があるため[24]、再生効果に関するモデルが検討されてきた[39]。近年では再生効果に加え、逃げ面摩耗の影響を考慮したドリルのびびり特性の予測法[40]が提案されている。しかし、一般的なねじれ刃ドリルであっても、ミーリングや旋削と比べて工具幾何形状が複雑であるうえ、加工穴の壁面の拘束条件がびびり周波数に影響する現象が示唆されており[41]、さまざまな振動成分を含みうる、実際のドリル加工におけるびびり検知法を取り扱った事例は多くない。さらに、安定した加工条件であっても、刃先の研磨状態のばらつきや摩耗の進行によりびびりを生み、工具破損に繋がるおそれがあるため、加工監視の需要は高い[42]。したがって、複雑な振動成分を含む信号からびびりに関連する成分を特定し、びびりを起点とする不安定状態への遷移を高い応答性で検出する手法が求められている。そこで、第 3 章では、加速度信号の時間周波数表現とスペクトル尖度による解析を組み合わせた新たな特徴抽出と異常検知の手法を提案し、実際の製造環境におけるインプロセスびびり振動検知の可能性を、蒸気タービンロータの穴あけ工程で検証する。

1.2.2 切削加工における工具と加工表面性状の監視技術

前述のように、過去数十年にわたり工具の摩耗、折損、チッピングなどを対象として、切削抵抗、消費電力量、モータ電流、AE を監視する、間接法による TCM が研究されてきた。大型精密部品の加工監視に適用する際は、大型工作機械への実装を考慮した手法の選定が求められる。まず、切削抵抗に関しては実験室での計測に広く用いられてきたが、一般的な切削動力計は設置上の制約があるため、大型部品への適用が難しい[43]。消費電力に関しては、逃げ面摩耗や折損に関する工具劣化を検知できることが示されて

いる[44][45]. しかし、工作機械のモータの定格出力に応じて感度が変わるために、少量生産品において適切な閾値を設定して工具状態の予測を行うことが難しいという課題があった. これに対し、主軸や送り軸のモータの電流値は、工具・プロセス状態に関する情報が含まれており、それらをさらに分析することで、高度な情報が得られる可能性を残している[46]. これらを発展させた事例として、CNC のサーボ情報を利用したセンサレスの切削抵抗検知法が提案されている[47][48]. 一方で Fig. 1-6 に示すように、切削における AE は、摩擦、塑性変形、切屑の破断などで発生し、加工における除去サイズと AE 信号の周波数範囲が Lee ら[49]によってまとめられている. また、切削[50]、研削[51]、研磨[52]の加工監視だけでなく、工具と工作物の接触検知への応用[53]もみられる. AE の監視により、ほかのセンサでは捉えにくい微細な破壊に関する情報を高い感度で得られる可能性があるが、AE の発生に関わる予測モデル[54]の精度や、伝達経路などの影響によるばらつきが応用面で課題となる. したがって、実用的な加工監視システムを構築するためには、所望の検出能力を有するセンサの選定に加え、適切な信号処理の仕組みと合理的な閾値設定の枠組みが求められる. このような問題に対しては、マルチセンサ融合戦略が提唱されており[55][56]、感度やばらつきなどの単一センサの弱点を補うだけでなく、工具の状態遷移などを包括的に理解できる可能性を有している.

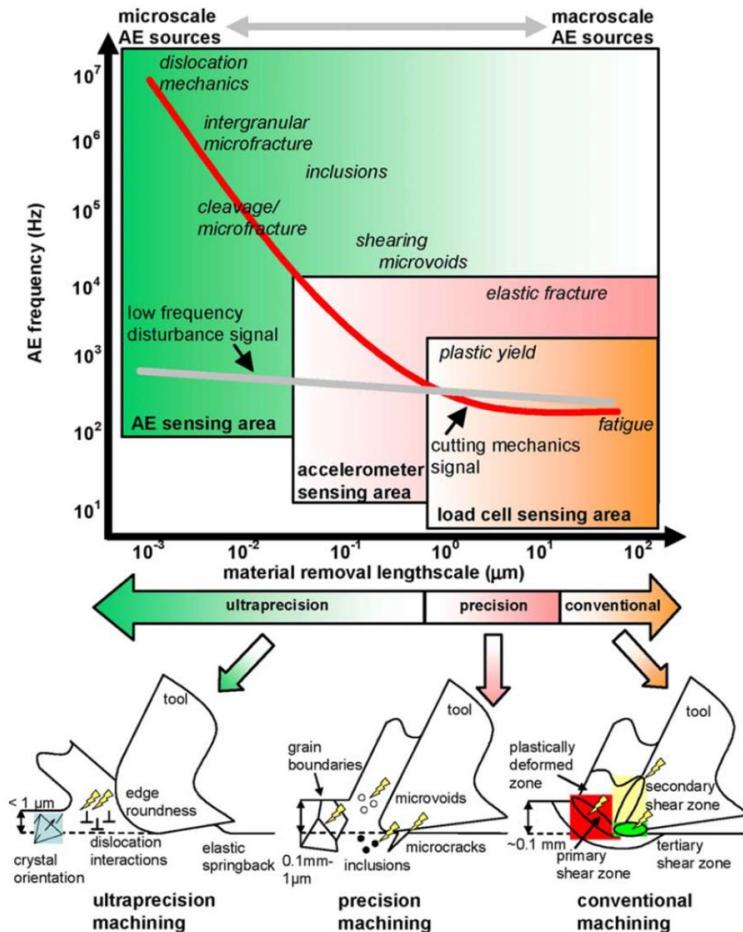


Fig. 1-6 Sources of AE in material removal process [49].

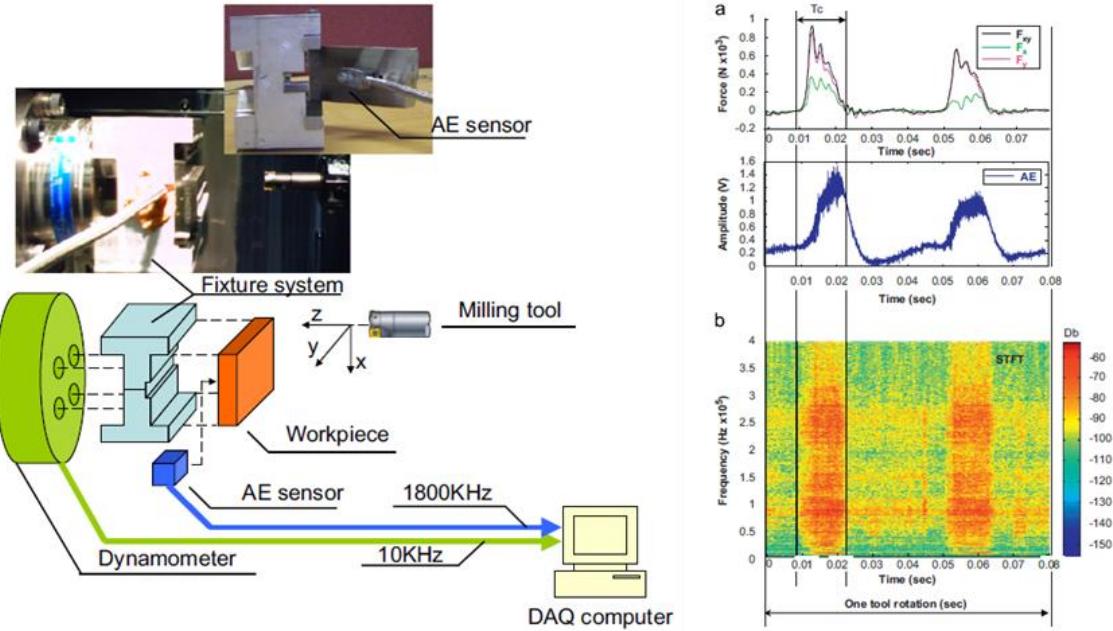


Fig. 1-7 Milling experiment using multi-sensor setup by Axinte [59].

次に大型精密部品の製造工程の特徴を考慮した、加工監視システムの要件を考える。これまでの TCM の研究では、負荷状態が大きく異なる複数の工程を単一の工作機械で実行する場合はほとんど想定されなかった。量産製品では製造ラインの均衡を考慮して、粗加工と仕上げ加工の工程を別々の工作機械で加工する戦略も採られる[57]が、大型精密部品では、段取り時間や加工精度を考慮して、粗・中・仕上げのような段階的な工程をひとつの工作機械に集約する戦略も有効である。このような場合、切削抵抗や消費電力を測る一般的なセンサでは、低負荷となる仕上げ工程で十分な感度が得られないおそれがある。このような問題に対して、Stavolopoulos ら[58]は、主軸モータ電流と加速度の特徴量を組み合わせた工具摩耗の予測を試み、一定の精度で推定できる結果を得ている。しかし、加速度を用いる場合は、摩擦や工作機械の動的特性に関する雑音除去に課題がある点も指摘された。これに対して Axinte ら[59]は、Fig. 1-7 に示すように、AE と切削抵抗の同期計測を試み、時間周波数解析を援用することで AE と切削抵抗の相関、および表面性状の異常状態と AE 発生の関係を見出すことに成功した。さらに、表面の異常を防止する制御方法[60]、および表面粗さを一定に保つ制御方法[61]など、加工条件を制御する仕組みも提案されている。このように近年の TCM では、摩耗に代表される工具状態に加え、製品の仕上げ加工面の品質保証にまで監視の対象が拡張されていることが特徴である。以上の背景を踏まえ、第 4 章では大型工作機械における複合的な工程を想定し、工具状態と加工表面性状に関連するさまざまな異常を包括的に監視することを目指し、主軸モータ電流と AE の特徴量を組み合わせた遷移状態の判定に基づく、マルチセンサ融合型の多機能かつロバストな加工監視システムを提案する。実際の製造環境における事例として蒸気タービンロータのミーリング加工を取り上げ、システムの妥当性を検証する。

1.2.3 大型精密部品のオンマシン計測技術

計測システムは品質保証の根幹をなすものであり、機械部品では所望の機能に応じた幾何公差に対し、不確かさを考慮した最適な計測戦略の選定が求められる[62]。また幾何公差と計測不確かさの関係は、生産性や製造費用とも密接な結びつきをもつ[63]。さらに製造業のプロセスチェーンにおいては、インプロセス・オンマシン計測の重要性が高まっている[64]。高い相対精度が求められる大型精密部品では、長さ寸法のトレーサビリティを考慮し、不確かさが適切に評価された計測システムを用いる必要がある。3次元座標測定機 (Coordinate measuring machine ; CMM) は1960年代に開発され、トレーサビリティの体系化により[65]品質保証に幅広く使用されている。しかしながら、部品形状によっては一般的な CMM への設置が難しく、マイクロメータや寸法計測用テープなど、不確かさが大きい手法に限られることもあった。したがって、大型工作機械におけるオンマシン計測法は、品質や生産性を改善する最も重要な課題のひとつと考えられる。欧州国立計量研究所連合 EURAMET (European Association of National Metrology Institutes) の報告[66]では、メートル～キロメートルオーダの精密な座標計測技術の需要が今後ますます増え、多くは大規模な工場、屋外、および地下トンネルなどの環境で使用されるとしている。また、LUMINAR (Large volume Unified Metrology for Industry Novel Applications & Research) プロジェクト[67]では、Table 1-2 に示すような具体的な計測対象と仕様が掲げられている。ほかにも大型構造部品の組み立て精度の管理[69]や、大型光学機器の形状計測[70]などの事例に加え、さまざまな計測の要素技術を集積し、多軸ロボットや工作機械の位置決め精度を補償する枠組みをもつ、光計測で管理された工場 (Light controlled factory) の概念[71]が報告されている。異なる計測機器により得られた結果を円滑に連携するためには、計測データに関するマルチセンサ融合方法も必要となる[72][73]。これらの大型構造物の計測技術は、特許の権利化も積極的に進められている[74]。

次に工作機械と関連した寸法計測技術を振り返る。1970年代より熱変位による加工寸法への影響が調査され[75]、1980年代の前半には、熱変位補正システムの提案[76]や加工精度の検証[77]が行われたほか、変位センサの自律校正による大型工作機械の真直度計測[78]も試みられている。1986年には Donmez らが工作機械の位置決め誤差と寸法補正に関する方法論を整理した[79]。これらを経て1989年に Shiraishi らは、部品寸法を管理するためのインプロセス・オンマシン計測技術を総括している[80]。一方で、さらに高精度

Table 1-2 LUMINAR project: Large Volume Metrology in Industry [68].

Aerospace		Advanced manufacturing		Big science
Airplane body (International traceability)	Airplane wing (Laminar flow wing, weight loss)	Factory of the future (Metrology networks, error map of large tools)	High value engineering such as jet engines (Thermal error compensation)	LHC replacement at CERN (10x better beam accuracy)
Need: calibrate/verify ADM SOA: requires intrinsic interferometer	Need: 100 μm full wing accuracy SOA: 400 μm	Need: < 100 μm SOA: 200 μm	Need: 100 μm in 15°C to 30 °C factory SOA: 200 μm, slow photogrammetry	Need: 10 μm accuracy in 200 m SOA: 100 μm to 300 μm
SOA: State of art		ADM: Absolute distance meter	LHC: Large hadron collider	

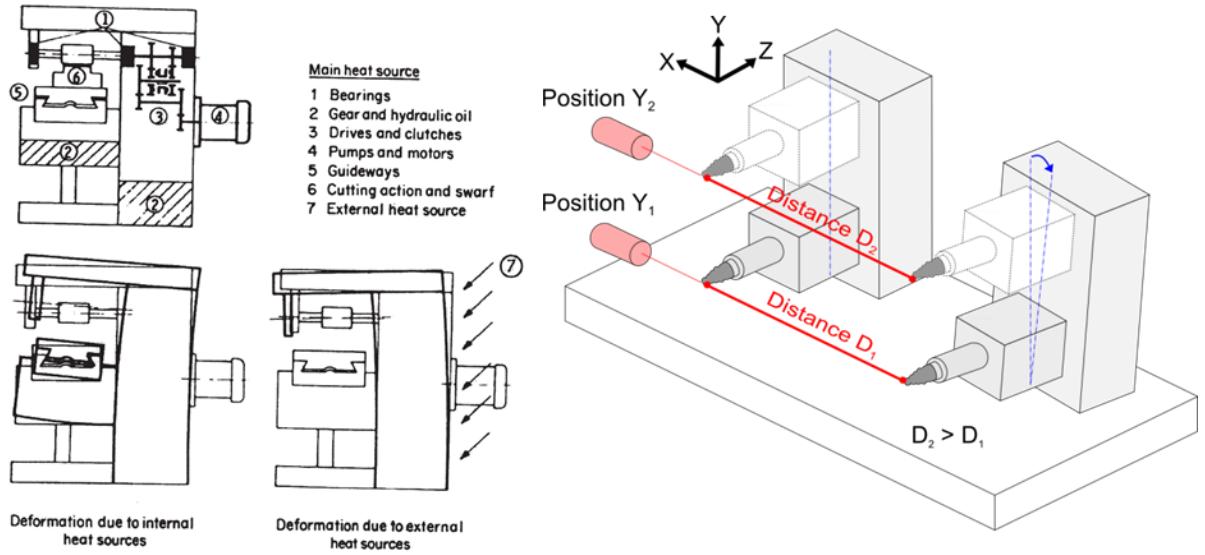


Fig. 1-8 Thermal effects on machine [81] (left, quoted in [82]) and positioning error due to volumetric error (right).

なオンマシン計測を実現するには、位置決め誤差の厳密な取り扱いが求められる。Fig. 1-8(a)に示す熱変位の要因[81][82]に加え、大型構造物の組み立て精度の影響で空間的な誤差が生じ、Fig. 1-8(b)に例示する 1 方向の距離に対しても位置の依存性をもつ可能性がある。この問題に対し、1995 年には Weck ら[83]が熱変位によって工作機械に生じる幾何的誤差の影響を整理した。同時期に Sartori ら[84]は要求精度に対する誤差の補償方法を課題と位置付けた。2000 年以降は、機械構造のモデル化[85]やヒステリシスの影響を精査[86]する研究に加え、Schwenke らによる専用測定機の開発[87][88][89]の結果、短時間で大型工作機械のもつ 3 次元的な位置決め誤差を可視化することが可能となった。これに伴い CNC に空間補正機能が用意され、多軸[90]・大型工作機械[91]に対する精度検証のほか、空間誤差のモデル化[92][93]や、測定戦略と不確かさの検討[94][95]などが進んでいる。2010 年以降は、5 軸以上の制御軸を有する多軸工作機械に特有の誤差評価手法にも注目が集まり、Mayr[96]らや Ibaraki ら[97]によって研究動向がまとめられている。

要求精度が高まる現代の製造業において、工作機械の精度管理には依然として多くの課題があり、機械構造、案内、熱変形、空間誤差計測、工作物の把持、および加工プロセスなどの要因が検討項目となる[96]。前述の EURAMET は 2013 年から 2016 年の 3 年間で、製造現場におけるトレーサブルなオンマシン計測を目指した開発である ‘Traceable in-process dimensional measurement’ を主導し、校正機器の開発[98]および機械構造の変動監視法[99][100]、環境変動の影響を精査する仕組み[101][102]などの研究が進められた。2016 年には Schmitt らによる大型部品計測の総括[15]において、Fig. 1-9 のような仮想的生産システムの概念が提示されている。これらの背景を考慮し、第 5 章では、大型精密部品を対象とした環境変動にロバストなオンマシン計測システムを提案し、蒸気タービンロータを事例に挙げて、空間補正を考慮したトレーサブルな計測法を検証する。

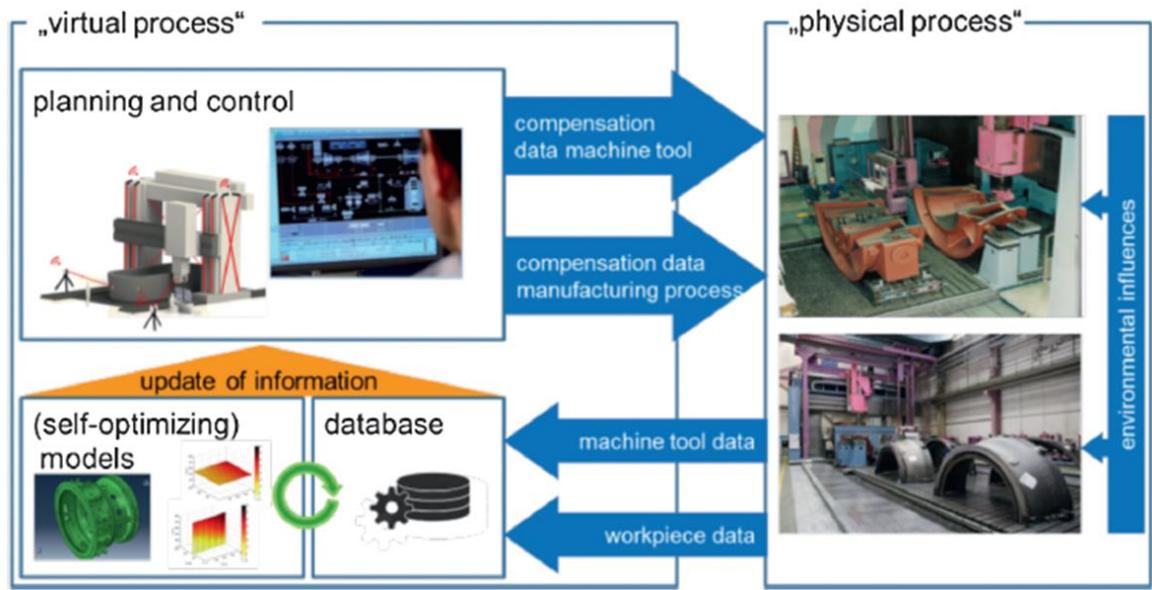


Fig. 1-9 Concept of CPPS (Cyber-physical production systems) for the manufacturing of large turbine housings by WZL RWTH Aachen University [15].

1.2.4 加工・計測システムの統合管理

前項までに生産品質に着目して加工・計測システムの方向性を俯瞰し, 本論文では多機能なマルチセンサ融合型システムを構築する目的を示した. さて, これらの集合体である製造ラインや工場を考えた場合, システムの配置・結合・統合管理に関して, 大型精密部品ではどのような戦略が適切であろうか. この問題に対するひとつの指標は, Allwood ら[103]が 2016 年に ‘Manufacturing at double the speed’ で提唱したように, 今日の製造期間をいかに短縮できるかというものであろう. 彼らは現代の製造業を律速している課題を掘り下げるため, プロセス・システム・連携関係 (Co-ordination) の 3 つの制約を挙げ, 事例研究を実施した. 大型精密部品のプロセスに関しては, 切削[104]・研削[105]・電気化学加工[106]などの各種の除去加工で, 生産性向上の研究が進められている. 本論文の主題は加工・計測システムであるが, 製造期間の短縮効果を獲得するためには, システム間やプロセスとの連携関係を戦略的に設計する必要がある.

ここで, 一般的な製造ラインを対象とした従来の連携関係の研究例を概観する. 工場全体の生産戦略の最適化に対しては, 製造実行システム (Manufacturing execution system ; MES) が業種に応じたパッケージとして提供されている[107]. 高度に階層化・システム化された工場では, 製造操業管理 (Manufacturing operation management ; MOM) の枠組みのもと, 組織の目標達成の度合いを示す重要業績評価指標 (Key performance indicator ; KPI) が定義される[108]. ISO22400[109]では, 生産設備のデータ収集の基準に関して, KPI 別に標準化が進められている. Fig. 1-10 は製造業における機能的階層モデルを表しており, その第 3 階層となる製造操業管理の KPI を定義することで, 統一的な指標で経営判断が行える. 一方で工作機械の領域では, CNC が実用化されてから長い期間を経て

も、設備間の情報連携は限られたものであった[111]. 近年でも設備間の類似性が高い量産製品では標準化が進む一方で、大型精密部品の製造現場では、Fig. 1-10 の 0 から 2 の階層にあたるプロセス管理に新たな戦略が求められる. これは前述の境界領域の課題が生産品質に直結することと対応する. Atluru ら[112]は 2011 年に加工監視・オンマシン計測機能、および意思決定に関する機能を備える知的生産システムの枠組みを Fig. 1-11 のように提示した. しかしながら、実際の製造環境下でシステムの配置戦略を検証した事例はない. 以上の背景を考慮し、第 2 章では大型精密部品の加工・計測システムの展開戦略に関して、蒸気タービン発電機の製造工程を事例に挙げて基礎的な検証を行う.

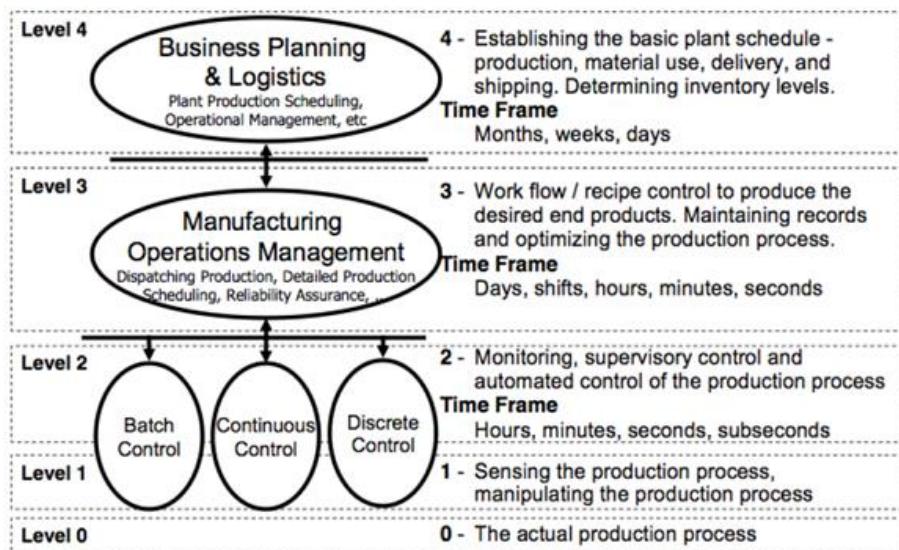


Fig. 1-10 Functional hierarchy model of a manufacturing enterprise [110].

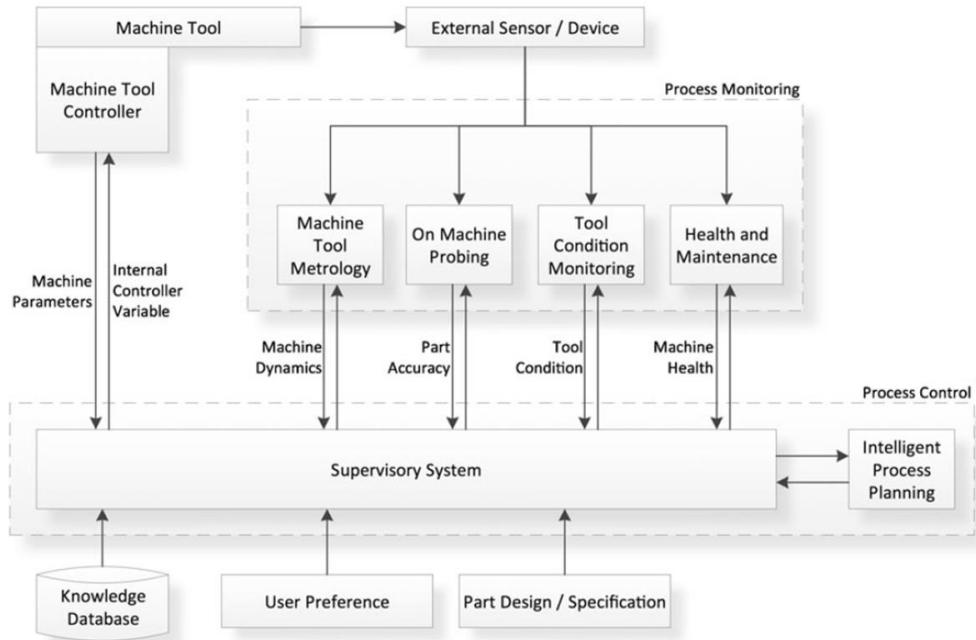


Fig. 1-11 Schematic of supervisory system architecture [112].

1.3 本論文の構成

関連研究の経緯を考慮し、既存の研究例では体系的な指針が確立されていない、大型かつ精密な部品を対象とした加工・計測システムの構築に取り組む。統合的な生産情報が最大限に活用される将来像を提示するため、以降の各章で議論する題目には、具体的な事例検証を含んでいる。社会基盤の分野で国際的な競争が進む状況で事業の持続的な成長を獲得するためには、限られた資源を有効に活用して顧客の望む製品を適時に供給することが求められる。本研究はこれらの背景によく合致する、蒸気タービン発電機の製造現場を例に挙げ、次世代の生産システムに必要となる、多機能性を備える加工監視・オンマシン計測技術に関する検証を行った。

第2章は「加工・計測システムの大型精密部品への展開戦略」と題し、製造工程における加工監視・オンマシン計測システムの効果的な展開を目指し、生産品質の保証に求められる技術水準と要件を体系的にまとめたうえで、製造現場の工作機械に対してシステムを実装・配置する戦略を述べる。さらに、蒸気タービン発電機の製造を対象として事例を検証し、第3章および第4章、第5章で取り扱う主題の位置付けと効果を導いた。

第3章は「時間周波数解析によるインプロセスびびり振動検知」と題し、加工監視の多機能化の検証事例として、信号の特徴抽出に基づく異常検知技術を取り上げた。動的特性が問題となる加工プロセスの加速度信号に対して時間周波数解析を適用し、びびり振動に対応する特徴量をその場で抽出する新たな手法を考案した。システムは蒸気タービンロータの穴あけ工程で検証する。

第4章は「工具摩耗・加工表面性状のマルチセンサ融合型異常検知」と題し、加工監視における多機能化・ロバスト化の事例として、マルチセンサ融合技術に着目した。工具の折損や仕上げ加工表面性状に関する異常を包括的に検知するため、主軸モータ電流とAE信号の特徴量を組み合わせた加工監視法と、少量生産における加工条件の不整合を防止する閾値設定の枠組みを提案した。システムは蒸気タービンロータの溝入れ工程で検証する。

第5章は「大型工作機械の空間補正によるオンマシン寸法計測」と題し、大型部品のトレーサブルな寸法計測技術に関して新たな方向性を提示する。工作機械上で継ぎ目のない加工・計測を実現し工程を合理化するため、空間誤差と環境変動を考慮したオンマシン計測手法を提案し、蒸気タービンロータの旋削工程における寸法計測で実証する。従来にない高い相対精度が求められるため、既存の複数の計測法との比較検証を含め、不確かさを精査する方針とした。

以上のように、生産品質の向上を主な目的として大型精密部品の加工・計測システムに求められる技術的要素を各章で個別に検証し、その将来像を可能な限り具体的に提示することを目指した。本論文の章構成をFig. 1-12に示す。

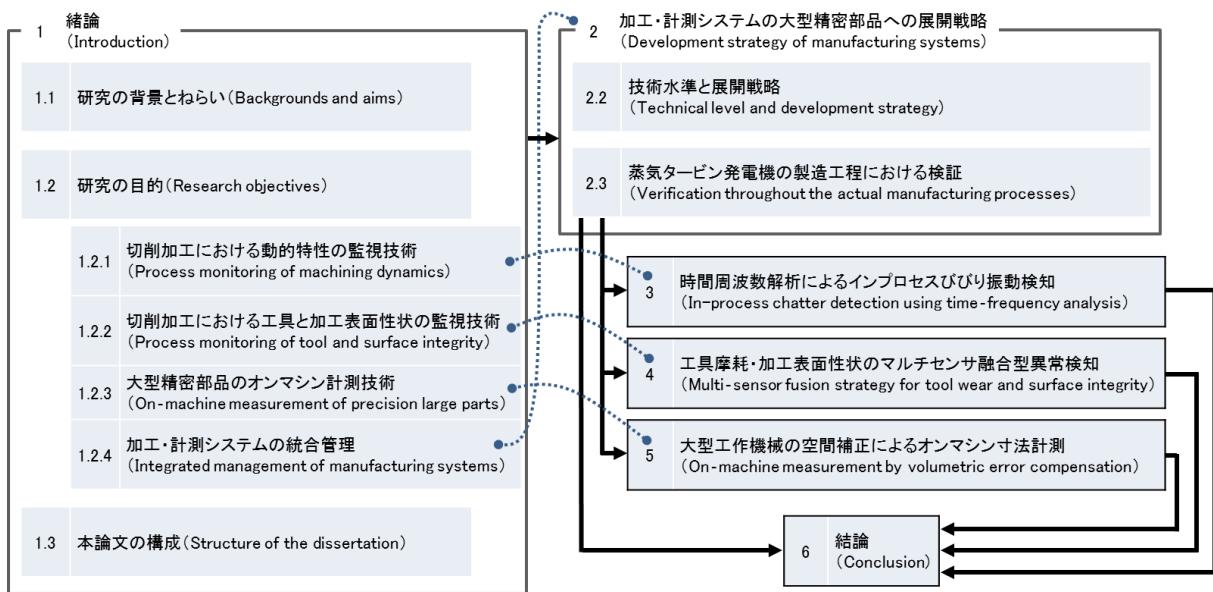


Fig. 1-12 Outline of the dissertation.

参考文献

- [1] Uriarte L, Zatarain M, Axinte D, Yagüe-Fabra J, Ihlenfeldt S, Eguia J, et al. Machine tools for large parts. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2013;62:731–50.
- [2] Allwang K. *Werkzeugmaschinen*. München: Deutsches Museum; 2002.
- [3] Taniguchi N. Current Status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing. *CIRP Ann - Manuf Technol* 1983;32:573–82.
- [4] Gao W, Kim SW, Bosse H, Haitjema H, Chen YL, Lu XD, et al. Measurement technologies for precision positioning. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2015;64:773–96.
- [5] Colledani M, Tolio T, Fischer A, Iung B, Lanza G, Schmitt R, et al. Design and management of manufacturing systems for production quality. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2014;63:773–96.
- [6] Mori Y, Yamauchi K, Endo K. Elastic emission machining. *Precis Eng* 1987;9:123–8.
- [7] Shimada S, Ikawa N, Tanaka H, Ohmori G, Uchikoshi J, Yoshinaga H. Feasibility Study on Ultimate Accuracy in Microcutting Using Molecular Dynamics Simulation. *CIRP Ann - Manuf Technol* 1993;42:91–4.
- [8] Byrne G, Dornfeld D, Denkena B. Advancing Cutting Technology. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2003;52:483–507.
- [9] Ueda N, Matsuo T, Uehara K. An Analysis of Saw-Toothed Chip Formation. *CIRP Ann - Manuf Technol* 1982;31:81–4.

- [10] D.F. Micheletti, W. Konig HRV. In process tool wear sensor for cutting operations. *CIRP Ann* 1976;25:483–96.
- [11] Tlusty J, Andrews GC. A Critical Review of Sensors for Unmanned Machining. *CIRP Ann - Manuf Technol* 1983;32:563–72.
- [12] Byrne G, Dornfeld D, Inasaki I, Ketteler G, König W, Teti R. Tool Condition Monitoring (TCM) — The Status of Research and Industrial Application. *CIRP Ann - Manuf Technol* 1995;44:541–67.
- [13] Teti R, Jemielniak K, O'Donnell G, Dornfeld D. Advanced monitoring of machining operations. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2010;59:717–39.
- [14] Schmitt R, Peterek M. Traceable measurements on machine tools-Thermal influences on machine tool structure and measurement Uncertainty. *Procedia CIRP* 2015;33:576–80.
- [15] Schmitt RH, Peterek M, Morse E, Knapp W, Galetto M, Härtig F, et al. Advances in Large-Scale Metrology – Review and future trends. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2016;65:643–65.
- [16] Merritt HE. Theory of Self-Excited Machine-Tool Chatter: Contribution to Machine-Tool Chatter Research—1. *J Eng Ind* 1965;87:447–54.
- [17] Tlusty J, Ismail F. Basic Non-Linearity in Machining Chatter. *CIRP Ann - Manuf Technol* 1981;30:299–304.
- [18] Smith S, Tlusty J. Efficient Simulation Programs for Chatter in Milling. *CIRP Ann - Manuf Technol* 1993;42:463–6.
- [19] Altintas Y, Budak E. Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling. *CIRP Ann - Manuf Technol* 1995;44:357–62.
- [20] Altintas Y, Weck M. Chatter Stability of Metal Cutting and Grinding. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2004;53:619–42.
- [21] Quintana G, Ciurana J. Chatter in machining processes: A review. *Int J Mach Tools Manuf* 2011;51:363–76.
- [22] Siddhpura M, Paurobally R. A review of chatter vibration research in turning. *Int J Mach Tools Manuf* 2012;61:27–47.
- [23] Atabay F, Lazoglu I, Altintas Y. Mechanics of boring processes - Part I. *Int J Mach Tools Manuf* 2003;43:463–76.
- [24] Roukema JC, Altintas Y. Generalized modeling of drilling vibrations. Part I: Time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation. *Int J Mach Tools Manuf* 2007;47:1455–73.
- [25] Shirase K, Altintas Y. Cutting force and dimensional surface error generation in peripheral milling with variable pitch helical end mills. *Int J Mach Tools Manuf* 1996;36:567–84.

- [26] Tewani SG, Rouch KE, Walcott BL. A study of cutting process stability of a boring bar with active dynamic absorber. *Int J Mach Tools Manuf* 1995;35:91–108.
- [27] Lee LC, Lee KS, Gan CS. On the correlation between dynamic cutting force and tool wear. *Int J Mach Tools Manuf* 1989;29:295–303.
- [28] Clancy BE, Shin YC. A comprehensive chatter prediction model for face turning operation including tool wear effect. *Int J Mach Tools Manuf* 2002;42:1035–44.
- [29] Shiraishi M, Kume E, Hoshi T. Suppression of Machine-Tool Chatter by State Feedback Control. *CIRP Ann - Manuf Technol* 1988;37:369–72.
- [30] Altintas Y, Chan PK. In-process detection and suppression of chatter in milling. *Int J Mach Tools Manuf* 1992;32:329–47.
- [31] Grabec I, Gradišek J, Govekar E. A New Method for Chatter Detection in Turning. *CIRP Ann - Manuf Technol* 1999;48:29–32.
- [32] Jiang CY, Zhang YZ, Xu HJ. In-Process Monitoring of Tool Wear Stage by the Frequency Band-Energy Method. *CIRP Ann - Manuf Technol* 1987;36:45–8.
- [33] Xiao W, Zi Y, Chen B, Li B, He Z. A novel approach to machining condition monitoring of deep hole boring. *Int J Mach Tools Manuf* 2014;77:27–33.
- [34] Cao H, Lei Y, He Z. Chatter identification in end milling process using wavelet packets and Hilbert–Huang transform. *Int J Mach Tools Manuf* 2013;69:11–9.
- [35] Tarn YS, Li TC, Chen MC. On-line drilling chatter recognition and avoidance using an ART2—A neural network. *Int J Mach Tools Manuf* 1994;34:949–57.
- [36] Pérez-Canales D, Álvarez-Ramírez J, Carlos Jáuregui-Correa J, Vela-Martínez L, Herrera-Ruiz G. Identification of dynamic instabilities in machining process using the approximate entropy method. *Int J Mach Tools Manuf* 2011;51:556–64.
- [37] Yao Z, Mei D, Chen Z. On-line chatter detection and identification based on wavelet and support vector machine. *J Mater Process Technol* 2010;210:713–9.
- [38] Tarn YS, Li TC. Adaptive pattern recognition of drilling chatter. *J Mater Process Technol* 1995;48:247–53.
- [39] Arvajeh T, Ismail F. Machining stability in high speed drilling-Part 1: Modeling vibration stability in bending. *Int J Mach Tools Manuf* 2006;46:1563–72.
- [40] Ahmadi K, Altintas Y. Stability of lateral, torsional and axial vibrations in drilling. *Int J Mach Tools Manuf* 2013;68:63–74.
- [41] Novakov T, Jackson MJ. Chatter problems in micro- and macrocutting operations , existing models , and influential parameters — a review. *Int J Adv Manuf Technol* 2010:597–620.
- [42] Jantunen E. A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling. *Int J Mach Tools Manuf* 2002;42:997–1010.

- [43] Milfelner M, Cus F, Balic J. An overview of data acquisition system for cutting force measuring and optimization in milling. *J Mater Process Technol* 2005;164-165:1281-8.
- [44] Shao H, Wang HL, Zhao XM. A cutting power model for tool wear monitoring in milling. *Int J Mach Tools Manuf* 2004;44:1503-9.
- [45] Al-Sulaiman F a., Baseer MA, Sheikh AK. Use of electrical power for online monitoring of tool condition. *J Mater Process Technol* 2005;166:364-71.
- [46] Prickett PW, Siddiqui RA, Grosvenor RI. A microcontroller-based end milling cutter monitoring and management system. *Int J Adv Manuf Technol* 2011;55:855-67.
- [47] Shinno H, Hashizume H, Yoshloka H. Sensor-less Monitoring of Cutting Force during Ultraprecision Machining. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2003;52:303-6.
- [48] Kakinuma Y, Sudo Y, Aoyama T. Detection of chatter vibration in end milling applying disturbance observer. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2011;60:109-12.
- [49] Lee DE, Hwang I, Valente CMO, Oliveira JFG, Dornfeld D a. Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission. *Int J Mach Tools Manuf* 2006;46:176-88.
- [50] Dornfeld DA, Kannatey-Asibu E. Acoustic emission during orthogonal metal cutting. *Int J Mech Sci* 1980;22:285-96.
- [51] Inasaki I, Okamura K. Monitoring of Dressing and Grinding Processes with Acoustic Emission Signals. *CIRP Ann - Manuf Technol* 1985;34:277-80.
- [52] Kojima T, Miyajima M, Akaboshi F, Yogo T, Ishimoto S, Okuda A. Application of CMP process monitor to Cu polishing. *IEEE Trans Semicond Manuf* 2000;13:293-9.
- [53] Min S, Lidde J, Raue N, Dornfeld D. Acoustic emission based tool contact detection for ultra-precision machining. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2011;4-7.
- [54] Sainj DP, Park YJ. A quantitative model of Acoustic emission in orthogonal cutting operation. *J Mater Process Technol* 1996;58:343-50.
- [55] Dornfeld DA, DeVries MF. Neural Network Sensor Fusion for Tool Condition Monitoring. *CIRP Ann - Manuf Technol* 1990;39:101-5.
- [56] Dimla DE. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations—a review of methods. *Int J Mach Tools Manuf* 2000;40:1073-98.
- [57] Metternich J, Abele E, Bechtloff S, Seifermann S. Static total cost comparison model to identify economic fields of application of Cellular Manufacturing for milling and drilling processes versus done-in-one-concepts. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2015;64:471-4.
- [58] Stavropoulos P, Papacharalampopoulos A, Vasiliadis E, Chryssolouris G. Tool wear predictability estimation in milling based on multi-sensorial data. *Int J Adv Manuf Technol* 2016;82:509-21.

- [59] Marinescu I, Axinte D a. A critical analysis of effectiveness of acoustic emission signals to detect tool and workpiece malfunctions in milling operations. *Int J Mach Tools Manuf* 2008;48:1148–60.
- [60] Marinescu I, Axinte DA. An automated monitoring solution for avoiding an increased number of surface anomalies during milling of aerospace alloys. *Int J Mach Tools Manuf* 2011;51:349–57.
- [61] Zuperl U, Cus F. Surface roughness fuzzy inference system within the control simulation of end milling. *Precis Eng* 2016;43:530–43.
- [62] Moroni G, Petrò S. Optimal inspection strategy planning for geometric tolerance verification. *Precis Eng* 2014;38:71–81.
- [63] Savio E, De Chiffre L, Carmignato S, Meinertz J. Economic benefits of metrology in manufacturing. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2016;65:495–8.
- [64] Takaya Y. In-Process and On-Machine Measurement of Machining Accuracy for Process and Product Quality Management: A Review. *Int J Autom Technol* 2014;8:4–19.
- [65] Peggs GN, McKeown PA. Creating a Standards Infrastructure for Co-Ordinate Measurement Technology in the UK. *CIRP Ann - Manuf Technol* 1989;38:521–3.
- [66] EURAMET TC-L roadmap: “Large Volume and Long Range metrology”
<https://www.euramet.org/>
- [67] Lewis A, The LUMINAR JRP - Large Volume Metrology in Industry, Large Volume Metrology Conference, Manchester, UK 2014.
- [68] LUMINAR Large Volume Metrology in Industry
<http://projects.npl.co.uk/luminar/publications/>
- [69] Maropoulos PG, Guo Y, Jamshidi J, Cai B. Large volume metrology process models: A framework for integrating measurement with assembly planning. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2008;57:477–80.
- [70] Zobrist TL, Burge JH, Davison WB, Martin HM. Measurements of large optical surfaces with a laser tracker. In: Atad-Ettedgui E, Lemke D, editors. *Proc. SPIE*, 2008, p. 70183U.
- [71] Muelaner JE, Maropoulos PG. Large volume metrology technologies for the light controlled factory. *Procedia CIRP* 2014;25:169–76.
- [72] Galetto M, Mastrogiacomo L, Maisano D, Franceschini F. Cooperative fusion of distributed multi-sensor LVM (Large Volume Metrology) systems. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2015;64:483–6.
- [73] Franceschini F, Galetto M, Maisano D, Mastrogiacomo L. Combining multiple Large Volume Metrology systems: Competitive versus cooperative data fusion. *Precis Eng* 2016;43:514–24.

- [74] Franceschini F, Maisano D. The evolution of large-scale dimensional metrology from the perspective of scientific articles and patents. *Int J Adv Manuf Technol* 2014;70:887–909.
- [75] Shiraishi M. In-Process Control of Workpiece Dimension in Turning. *Ann CIRP* 1979;28:333–7.
- [76] Hoshi T. Technology for the control of quality in automated manufacturing. *Precis Eng* 1981;3:167–71.
- [77] Takeuchi Y, Sakamoto M, Sata T. Improvement in the working accuracy of an nc lathe by compensating for thermal expansion. *Precis Eng* 1982;4:19–24.
- [78] Tanaka H, Tozawa K, Sato H, O-hori M, Sekiguchi H, Taniguchi N. Application of a New Straightness Measurement Method to Large Machine Tool. *CIRP Ann - Manuf Technol* 1981;30:455–9.
- [79] Donmez MA, Blomquist DS, Hocken RJ, Liu CR, Barash MM. A general methodology for machine tool accuracy enhancement by error compensation. *Precis Eng* 1986;8:187–96.
- [80] Shiraishi M. Scope of in-process measurement, monitoring and control techniques in machining processes—Part 2: In-process techniques for workpieces. *Precis Eng* 1989;11:27–37.
- [81] Weck M. *Handbook of Machine Tools: Metrological Analysis and Performance Tests*, Vol. 4. John Wiley and Sons; 1984.
- [82] Ramesh R, Mannan MA, Poo AN. Error compensation in machine tools—a review: Part II: thermal errors. *Int J Mach Tools Manuf* 2000;40:1257–84.
- [83] Weck M, McKeown P, Bonse R, Herbst U. Reduction and Compensation of Thermal Errors in Machine Tools. *CIRP Ann - Manuf Technol* 1995;44:589–98.
- [84] Sartori S, Zhang GX. Geometric Error Measurement and Compensation of Machines. *CIRP Ann - Manuf Technol* 1995;44:599–609.
- [85] Gomez-Acedo E, Olarra A, Orive J, Lopez de la Calle LN. Methodology for the design of a thermal distortion compensation for large machine tools based in state-space representation with Kalman filter. *Int J Mach Tools Manuf* 2013;75:100–8.
- [86] Tan B, Mao X, Liu H, Li B, He S, Peng F, et al. A thermal error model for large machine tools that considers environmental thermal hysteresis effects. *Int J Mach Tools Manuf* 2014;82-83:11–20.
- [87] Schwenke H, Franke M, Hannaford J, Kunzmann H. Error mapping of CMMs and machine tools by a single tracking interferometer. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2005;54:475–8.
- [88] Schwenke H, Knapp W, Haitjema H, Weckenmann A, Schmitt R, Delbressine F. Geometric error measurement and compensation of machines—An update. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2008;57:660–75.

- [89] Schwenke H, Schmitt R, Jatzkowski P, Warmann C. On-the-fly calibration of linear and rotary axes of machine tools and CMMs using a tracking interferometer. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2009;58:477–80.
- [90] Wang J, Guo J, Zhang G, Guo B, Wang H. The technical method of geometric error measurement for multi-axis NC machine tool by laser tracker. *Meas Sci Technol* 2012;23:045003.
- [91] Feng WL, Yao XD, Azamat A, Yang JG. Straightness error compensation for large CNC gantry type milling centers based on B-spline curves modeling. *Int J Mach Tools Manuf* 2015;88:165–74.
- [92] Zhong G, Wang C, Yang S, Zheng E, Ge Y. Position geometric error modeling, identification and compensation for large 5-axis machining center prototype. *Int J Mach Tools Manuf* 2015;89:142–50.
- [93] Aguado S, Samper D, Santolaria J, Aguilar JJ. Identification strategy of error parameter in volumetric error compensation of machine tool based on laser tracker measurements. *Int J Mach Tools Manuf* 2012;53:160–9.
- [94] Linares J-M, Chaves-Jacob J, Schwenke H, Longstaff A, Fletcher S, Flore J, et al. Impact of measurement procedure when error mapping and compensating a small CNC machine using a multilateration laser interferometer. *Precis Eng* 2014;38:578–88.
- [95] Ezedine F, Linares J-M, Sprauel J-M, Chaves-Jacob J. Smart sequential multilateration measurement strategy for volumetric error compensation of an extra-small machine tool. *Precis Eng* 2015;43:178–86.
- [96] Mayr J, Jedrzejewski J, Uhlmann E, Alkan Donmez M, Knapp W, Härtig F, et al. Thermal issues in machine tools. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2012;61:771–91.
- [97] Ibaraki S, Knapp W. Indirect Measurement of Volumetric Accuracy for Three-Axis and Five-Axis Machine Tools : A Review. *Int J Autom Technol* 2012;6:110-24.
- [98] McCarthy M. Metrology for machine tools: needs and expectations, Traceable in-process dimensional measurement Final Workshop. Braunschweig, Germany: 2016.
- [99] Schwenke H. Large parts with critical tolerances: Concepts and possible solutions for traceable CMM measurements on machine tools, Traceable in-process dimensional measurement Final Workshop. Braunschweig, Germany: 2016.
- [100] Gorka Kortaberria. Characterization of large machine tool volumetric behavior in workshop conditions, Traceable in-process dimensional measurement Final Workshop. Braunschweig, Germany: 2016.
- [101] Berger D. Operation and behaviour of a climate simulation chamber developed for investigations of thermal effects on machine tools, Traceable in-process dimensional measurement Final Workshop. Braunschweig, Germany: 2016.

- [102] Frank Keller. Traceability of on-machine measurements under a wide range of working conditions, Traceable in-process dimensional measurement Final Workshop. Braunschweig, Germany: 2016.
- [103] Allwood JM, Childs THC, Clare AT, Silva AKMD, Dhokia V, Hutchings IM, et al. Manufacturing at double the speed. *J Mater Process Technol* 2015;229:729–57.
- [104] M'Saoubi R, Axinte D, Soo SL, Nobel C, Attia H, Kappmeyer G, et al. High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2015;64:557–80.
- [105] Oliveira JFG, Silva EJ, Guo C, Hashimoto F. Industrial challenges in grinding. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2009;58:663–80.
- [106] Klocke F, Klink A, Veselovac D, Aspinwall DK, Soo SL, Schmidt M, et al. Turbomachinery component manufacture by application of electrochemical, electro-physical and photonic processes. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2014;63:703–26.
- [107] Váncza J, Monostori L, Lutters D, Kumara SR, Tseng M, Valckenaers P, et al. Cooperative and responsive manufacturing enterprises. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2011;60:797–820.
- [108] Unver HO. An ISA-95-based manufacturing intelligence system in support of lean initiatives. *Int J Adv Manuf Technol* 2012;1–14.
- [109] ISO/WD 22400-2, Manufacturing operations management — Key performance indicators — Part 2: Definitions and descriptions of KPIs 2009.
- [110] IEC 62264-3:2007, Enterprise-control system integration — Part 3: Activity models of manufacturing operations management 2007.
- [111] MTConnect
<http://www.mtconnect.org/>
- [112] Atluru S, Huang SH, Snyder JP. A smart machine supervisory system framework. *Int J Adv Manuf Technol* 2011;58:563–72.

第2章 加工・計測システムの大型精密部品への展開戦略

2.1 緒言

大型精密部品の製造工程において、加工監視システムおよびオンマシン計測システムを効果的に展開するためには、生産品質の保証に必要となる技術水準と要件を体系的にまとめたうえで、製造現場の工作機械に対してシステムを適正に実装・配置する戦略が求められる。2.2 では本論文の対象とする技術の範囲と将来像を含めた方針を示し、2.3 で蒸気タービン発電機の製造工程におけるシステム化を事例に挙げて検証した。

2.2 技術水準と展開戦略

1.1 での議論と同じく精密加工システムの基本要素である工具・工作物・工作機械から出発し、Fig. 2-1 に示すように、大型精密部品の製造における制約を含んだ状態を基準条件として、生産品質の確保に必要となるシステム化の技術水準を検討していく。一般的な工作機械には、主軸、送り軸、駆動機構、案内などの構成要素や、油圧、空圧などの供給系統に問題がある場合に警告する機能が備わるが、境界領域である加工・計測プロセスに関しては、独自に仕組みを構築する必要がある。基準条件では、生産品質が熟練作業者の判断に依存する可能性を含んでいた。この状況を改善するため、基準条件の 1 周外側に位置する「水準 2」は、センサ援用監視 (Sensor-assisted supervision) として、さまざまな物理量を実時間で計測・監視する段階とする。四角で囲まれたセンサ要素は、工具・工作物・工作機械との距離で関連性を定性的に表現しているが、この水準内ではセンサ要素間の連携関係はなく、単一の異常判定処理や自動計測作業を独立に実行する。したがって、生産品質に対する効果は限定的となる。さらにその外側の「水準 3」では、センサ統合監視・検査 (Sensor-integrated monitoring / inspection) を考え、センサ情報が計算機ソフトウェアなどを介して総合的に管理されている状態とする。例えば、加工監視であれば CNC と連携した TCM システム[1]、オンマシン計測であれば複雑な部品形状に対して計測経路を決定する CAT (Computer-aided testing) システム[2][3]が挙げられる。この水準までは一般的な製造業でも適用例がみられ、製品・プロセスのトレーサビリティの観点からも重要性が高まるものと思われる。しかし、加工監視における適応的閾値設定[4][5]、オンマシン計測の不確かさ[6]などは汎用システムでは考慮されないため、大型精密部品の生産品質保証に対しては万全とはいがたく、さらに包括的な機能を有するシステムへの発展が求められる。このような弱点を補完し、生産品質に対して決定的な効果をもたらす概念としてセンサ融合型 (Sensor-fused) 加工・計測システムを「水準 4」と定義し、本論文で提案・検証する技術範囲に設定する。Fig. 1-2 で述べた研究のねらいである「欠陥のない製造」の実現に関しても、水準 4 の施策となる、加工監視における

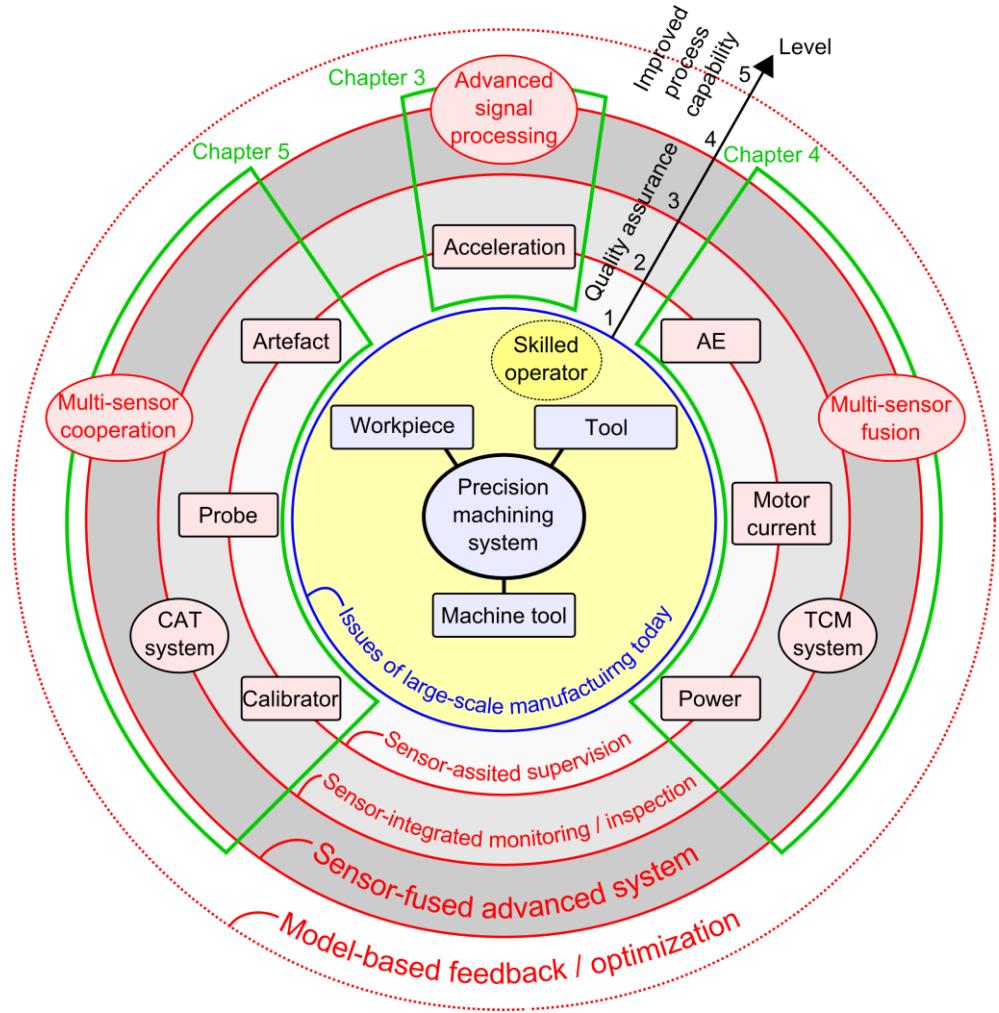


Fig. 2-1 Level of advanced monitoring techniques for precision large-scale manufacturing.

先端的信号処理法とマルチセンサ融合、およびオンマシン計測におけるマルチセンサ協調の 3 つの主題を軸としたシステムの構築と検証によって、最も重要な課題群への解決策を示していく。さらにその外側の「水準 5」では、高度化されたモデルに基づくプロセス最適化 (Model-based feedback / optimization) を、将来に実現されるべき姿として描いている。具体的な手法に関しては、既存研究例との関係性を含めて後述する。水準 1 から水準 4 までは生産品質を最優先にした枠組みであることが特徴である。一方で水準 5 では、工程能力 (Process capability) の飛躍的な向上をねらうものである。大型精密部品ではプロセス条件を抜本的に変更するための裏付けが難しく、いったん決められた条件が固定化される傾向にあるが[7]、将来に仮想工作機械 (Virtual machine tool) による負荷状態の予測[8]や部品劣化の推定[9]、およびプロセスシミュレータ (Virtual process system) [10]による切削抵抗・動的安定性解析、加工経路最適化などが、高速かつ柔軟な手順で実現されれば、マルチセンサ融合型加工・計測システムで得られた情報との組み合わせにより相乗効果が発揮されるものと思われる。

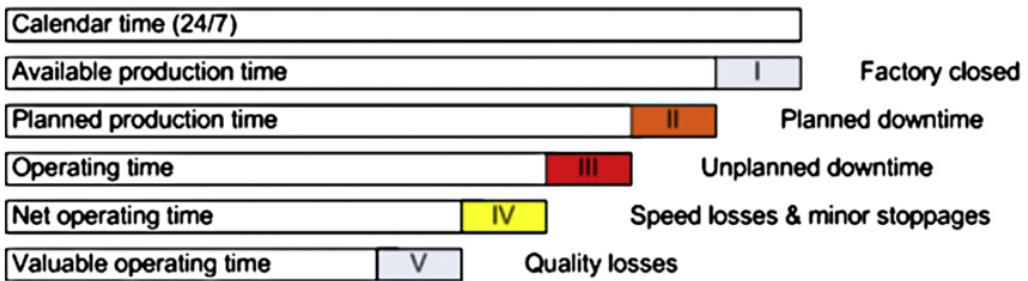
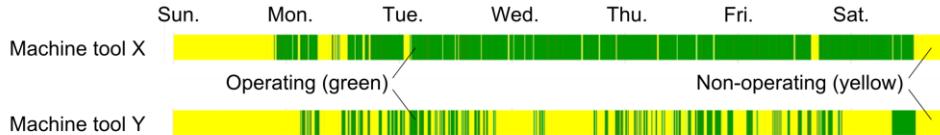


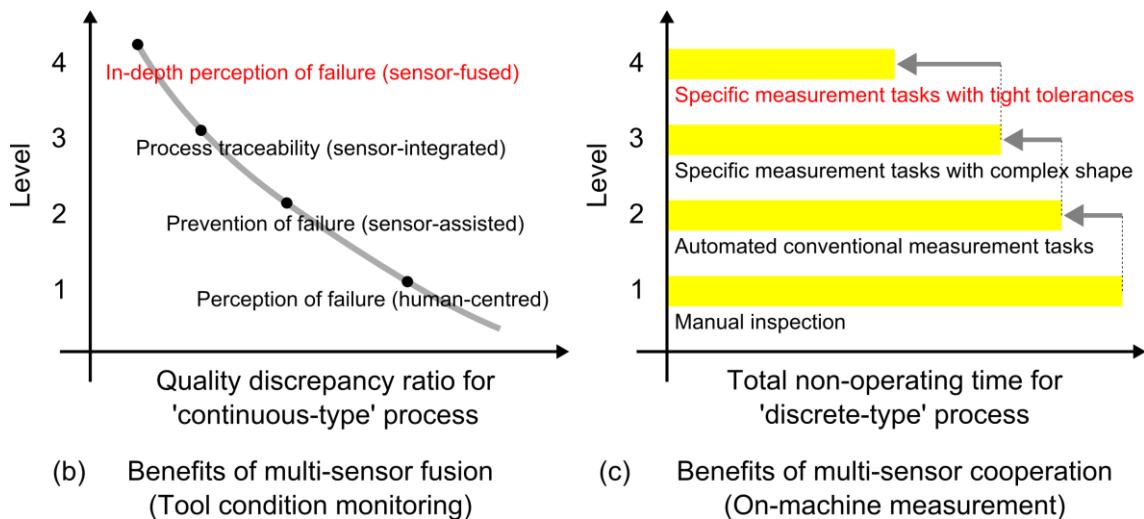
Fig. 2-2 Times considered in OEE. Roman numbers correspond to losses [14].

次に、製造工程の特徴を考慮したシステムの展開戦略を議論する。すべての工程に対して水準 4 の加工・計測システムを適用するのではなく、工作機械の稼働特性や工程のリードタイムに着目した配置を行うことで、システムへの投資効率を最大化することが目的である。まずは、稼働特性に関してマクロな観点での検討を試みる。量産製品では、設備総合効率 (Overall equipment effectiveness ; OEE) [11][12]などの指標に基づいて、生産性の最適化を検討した事例[13]がある。OEE は Fig. 2-2 に示す生産に関する時間の関係に基づいて算出され、いかに長い付加価値時間 (Valuable operating time) を確保できるかが要点となる。一方で、大型精密部品のような多品種少量生産品に対しては、製造現場における OEE の活用が十分でない点が指摘され、MEE (Manufacturing equipment effectiveness) などの専用の評価指標に対する議論がはじまりつつある[14]。自動運転化率が高い量産部品の製造とは異なり、大型精密部品では設備を停止した状態での計測作業などが含まれていることで、複雑な稼働履歴となる場合があり、注意を要する。

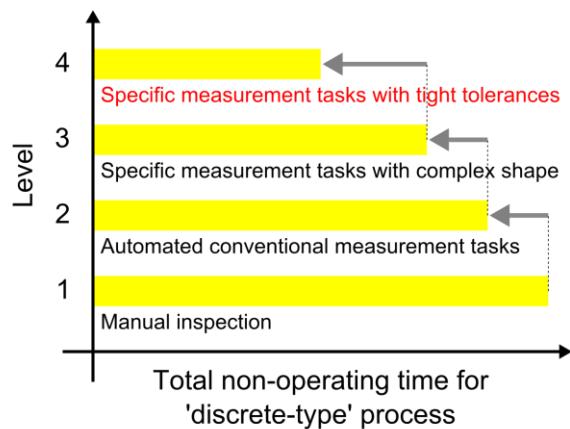
ここで、大型精密部品の製造工程における工作機械の稼働特性を例示して、システムの適用効果に言及する。工作機械が担う工程のリードタイムは数日～数週間である。Fig. 2-3(a)に工作機械の典型的な状態変化を時間軸で示す。稼働状態（緑色）は切削加工中であり、それ以外は非稼働状態（黄色）を表している。同一形状の加工を繰り返す工作機械 X の工程は高い割合で稼働状態を保ち、工程が途切れない連続型 (Continuous-type) である。また、各部位に固有の形状をもち頻繁な工具交換や計測・確認が求められる工作機械 Y の工程は、断続型 (Discrete-type) のように分類できる。それでは、加工・計測システムの効果はどのように発揮されるであろうか。加工監視を連続型の工程に適用した場合の、品質不良率の低減効果を Fig. 2-3(b)に模式的に示す。水準 1 の人による状態検知に対し、異常の防止（水準 2）、プロセストレーサビリティ（水準 3）、異常現象の詳細理解（水準 4）の利点を得る。また、オンマシン計測を断続型の工程に適用した場合に、非稼働時間の総和が技術水準の向上により短縮される効果を Fig. 2-3(c)に模式的に表す。水準 1 の手動検査作業に対し、自動化された汎用計測（水準 2）、複雑形状の計測（水準 3）、厳格な許容公差をもつ計測（水準 4）に対象が広がることで、工程の合理化が実現される。



(a) Typical machine tool utilization



(b) Benefits of multi-sensor fusion
(Tool condition monitoring)



(c) Benefits of multi-sensor cooperation
(On-machine measurement)

Fig. 2-3 Overview of machine tool utilization and benefits of sensor-fused systems.

以上で生産品質に関わる加工・計測システムの要件と、適用効果を述べた。例示したリードタイムの長い工程では、水準4のシステムが効果的に活用されることが見込まれ、第3章から第5章で詳細な開発内容を議論する。一方で、対象工程の長短や生産品質への影響度、および設備投資費用などとのバランスから、水準2や水準3を積極的に選択する場合も考えられる。そこで、2.3では蒸気タービン発電機の製造工程を対象として、システムの構成内容をより具体化した形で問題を扱う。

製造現場に展開する際に求められる加工監視システムの機能仕様と、展開戦略をTable 2-1に示す。水準2の基本的な機能は、工具や工作物の把持・拘束状態を示す物理量など、プロセス固有の特徴量を常時監視し、異常の兆候を検知した際に安全な経路で工作機械の停止動作を行うものである。水準3は、時間変化する物理量を実時間で信号処理し、プロセスの特徴にあった閾値設定で異常を検知する機能とした。これに対して水準4は、時間周波数解析に基づいて異常と相關する特徴量を高い感度で検知する信号処理法や、マルチセンサ融合型の加工監視における適応的な閾値管理手法を位置付けた。びびりや工具損傷などの生産品質に関わる危険性を低減し、欠陥のない製造を実現するための最重要項目である。また、水準5のプロセスモデルに基づいた加工条件の適正化は、切削現象、工具経路、工具・工作物形状などの多岐にわたる解析技術や不確かさを考慮した推定手法が求められるため、将来の課題として取り扱うが、加工監視情報との結びつきを強め、生産品質を維持しながら工程能力を向上させる枠組みとして期待される。

Table 2-1 Solutions for tool condition monitoring.

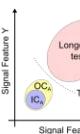
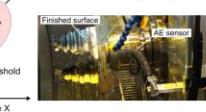
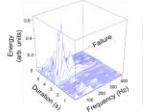
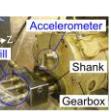
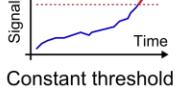
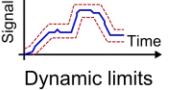
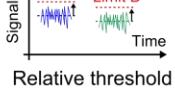
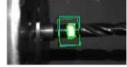
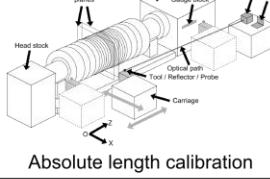
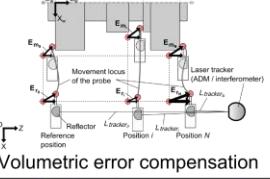
Technological level	Fundamental feature	Strategy
Level 5 Model-based feedback / Process optimization	Material removal  Tool path  Tool geometry  Structural dynamics 	
Level 4   Advanced TCM (Multi-sensor fusion / Advanced signal processing)	Prediction of process  In-depth perception of failure  Adaptive thresholding  Time-frequency analysis  	
Level 3   Sensor-integrated TCM	Constant threshold  Dynamic limits  Relative threshold 	
Level 2   Sensor-assisted TCM	Machine vision  Prevention of failure  Pneumatic sensor 	
Level 1 Human-centred monitoring	Lack of real-time capability and traceability	
 Future consideration	 Scientific topic discussed in chapter 3 and chapter 4	 Appropriation of conventional techniques
	Indispensable for ensuring the production quality of large-scale components	
	Suitable for conventional mechanical components	

Table 2-2 Solutions for on-machine measurement.

Technological level	Fundamental feature	Strategy
Level 5 Uncertainty management	Model-based prediction of measurement uncertainty	
Level 4  Specific measurement tasks with tight tolerances	Absolute length calibration  Volumetric error compensation 	
Level 3   Specific measurement tasks with complex shape	CAD model  CAT for Machine tool  Task-specific measurement 	
Level 2   Automated conventional measurement tasks	Touch-trigger probe  Probe calibration  On-machine measurement 	
Level 1 Manual inspection	Poor repeatability / Time consuming	
 Future consideration	 Scientific topic discussed in chapter 5	 Appropriation of conventional techniques
	Indispensable for ensuring the production quality of large-scale components	
	Suitable for conventional mechanical components	

次に Table 2-2 に示すオンマシン計測の機能と展開戦略を述べる。「断続型」の運転となる要因のひとつが計測作業であり、手動検査の手順を、水準 2 の繰り返し精度が高いオンマシン計測へ置き換えて合理化することが求められる。大型精密部品における基本的な品質管理項目は、加工後の寸法である。水準 3 で扱うような、一般的な公差水準で複雑な 3 次元形状を有する工作物もある反面、幾何形状は統一的であるが、高い相対寸法精度が求められる対象では、水準 4 のシステムが不可欠となる。そこで、前者では CAT システムを利用して工作機械に 3 次元座標測定機と同等の計測機能を与え、後者では空間誤差の影響を考慮した長さトレーサブルなオンマシン計測システムを開発する。また、水準 5 の大型精密部品に対する計測不確かさの管理に関する事例はほとんどみられず、1.2.3 でふれたように、機械構造、熱変位、空間誤差などが個別に議論されている状況である。しかしながら、計算機を援用した製造技術の統合的活用の将来像として、これらの機能を融合した精度予測・検証の枠組みは、今後きわめて重要なものと思われる。

以上により、大型精密部品の製造現場における工作機械とプロセス、および工程の特性を考慮し、生產品質の向上を目的とした加工監視およびオンマシン計測システムの展開戦略を示した。本論文の対象範囲であるシステムと、製造に関わる要素の関係を示した全体像を Fig. 2-4 にまとめた。製造現場 (Shop floor) の階層では、開発した加工・計測システムが工作機械を援用しながら、プロセスのトレーサビリティ確保に貢献している。対象範囲外では、工作機械の故障診断に関する高度化が求められており [16][17]、概念図に診断システム (Health analyzer) を併記している。このような現場のデータを収集・活用する次の段階として、システムで取得したデータ群、仮想環境で構築されたモデル、および両者をつなぐ予測技術 (Prognosis) [18] の 3 者の連携 (Quality loop) により、さらに高度な生產品質を目指す姿が考えられる。これによりプロセスの状態を高い精度で推定することが可能となり、工程能力の向上に寄与する枠組みとなる。さらにその上位には製造操業管理の階層が位置付けられ、1.2.4 で言及した仕組みや、OEE・MEE などのマクロな経営指標と結びつけられることになる。

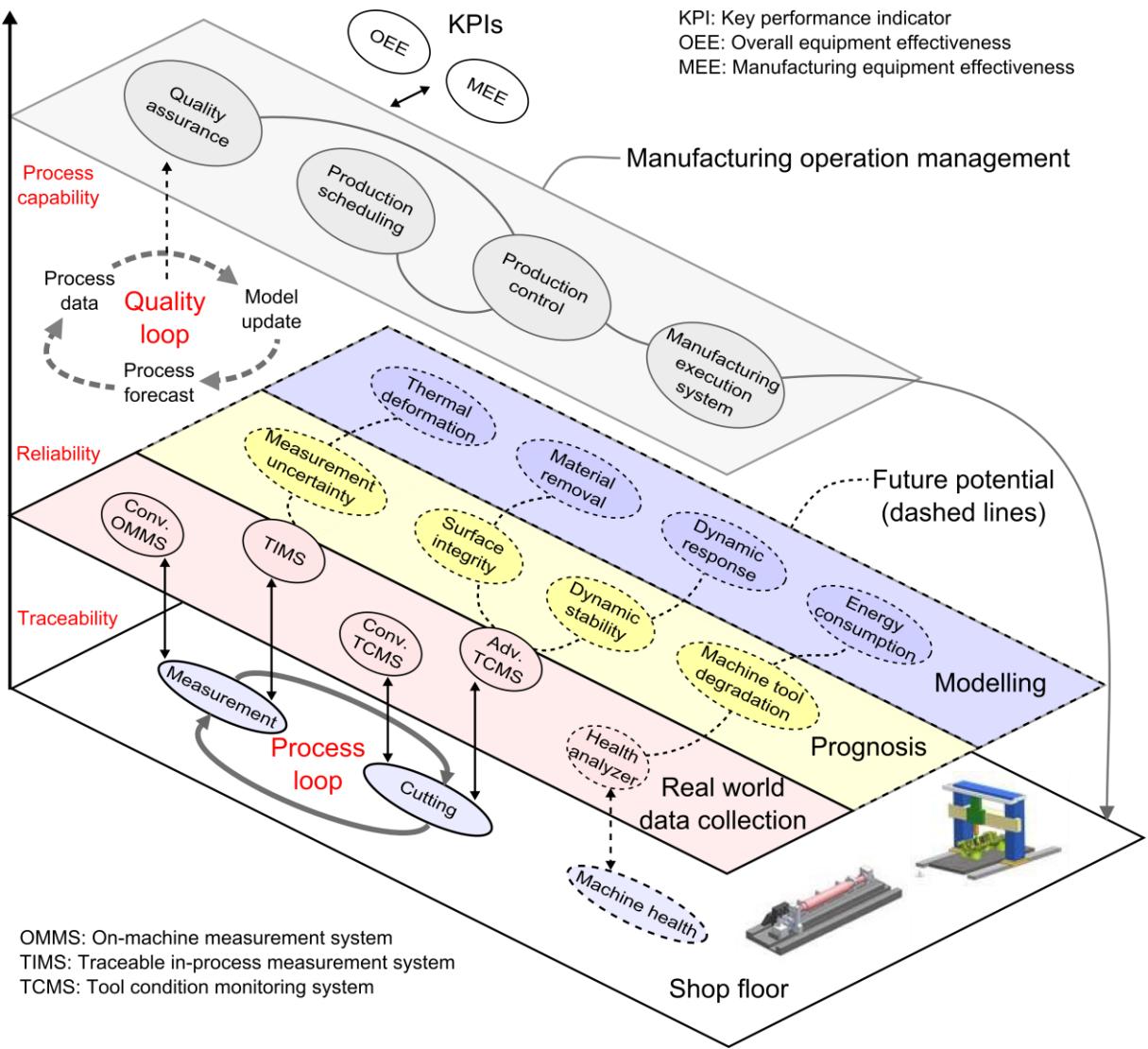


Fig. 2-4 Conceptual drawing of quality loop for precision large-scale manufacturing.

2.3 蒸気タービン発電機の製造工程における検証

蒸気タービン発電機の製造工程において、前節の方針を検証する。機械加工に関わる部品としては、蒸気タービンのロータおよびケーシング、発電機のロータおよびステータが挙げられる。これらの大型構造物に対し、動翼や静翼部品などはここでは扱わない。対象とした工程を Fig. 2-5 に、それぞれの適用目的と備えた機能を Table 2-3 に示す。E₁ から E₄ は加工監視、E₅ から E₈ はオンマシン計測に関連している。これらは工作機械に付随するサブシステムとして実装した。水準 4 に該当する E₁ および E₂、E₅ の事例はいずれも蒸気タービンロータを対象とし、それぞれ第 4 章および第 3 章、第 5 章で述べる。いずれも独自に開発した加工監視・オンマシン計測システムであり、総合的な品質保証に貢献する。E₃ は発電機ロータの周方向に配置されるスロット溝工程の事例であり、時

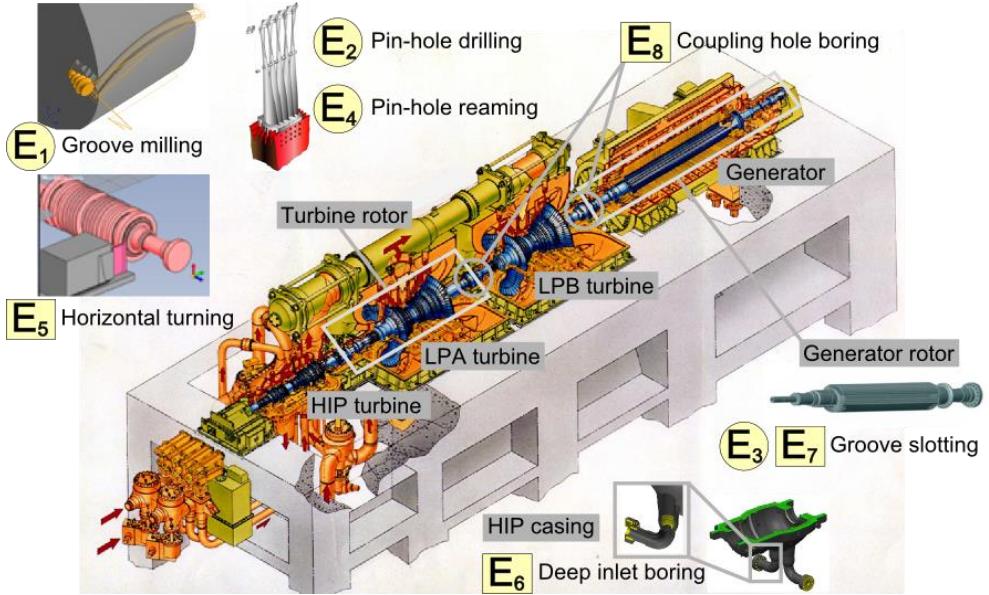


Fig. 2-5 Key manufacturing subsystems for production quality.

Table 2-3 Summary of scope and system implementation.

Example (Level)	Process	Scope	System implementation (Sensors/ Signal processing / Modelling)
E ₁ (TCM-4)	Groove milling	Tool wear Surface integrity	Spindle motor current Acoustic emission Adaptive thresholding
E ₂ (TCM-4)	Pin-hole drilling	Chatter vibration	Accelerometer Time-frequency analysis Dynamic modelling
E ₃ (TCM-3)	Groove slotting	Process variation Chip disposal	Spindle motor power Displacement sensor
E ₄ (TCM-2)	Pin-hole reaming	Chuck stability	Pneumatic sensor
E ₅ (OMM-4)	Horizontal turning	Volumetric error Absolute length	Laser tracker Lasertracer Artefact
E ₆ (OMM-3)	Deep inlet boring	In-line probing Path control	Extended fixture CAT framework
E ₇ (OMM-3)	Groove slotting	Multiple probing Path control	Extended probe CAT framework
E ₈ (OMM-2)	Coupling hole boring	Repeatability	Touch-trigger probe

OMM: On-machine measurement

系列信号の監視と異常発報が行える汎用 TCM システム (Marposs ARTIS CTM) を活用し、プロセスのばらつきを計測・管理している。航空機の製造における加工監視を取り扱った欧州の ACCENT プロジェクト[7]などで言及されているように、今後のプロセスデータの蓄積により、製品機能と対応付けたトレーサビリティ体系の構築が望まれる。E₄ ではリーマ穴加工中の工具把持状態の安定性を監視するため、空圧センサとリミッタによる監視を適用した。これらの工程の主要部分は「連続型」の運転であり、長期間にわたるプロセスをシステムで監視することで品質不良率を最小化し、製造現場における効率的な人員配置を可能とした。

オンマシン計測の適用事例に関しては、E₈ のように工作機械の主軸にタッチトリガプローブ[15]を取り付ける方式を基本としている。E₇ では、スロット溝の複雑な形状に対応するため、プローブヘッドに複数のプローブ球を含む十字型シャフトを備えた。3 次元座標測定機では一般的な手法であるが、それぞれのプローブ球に対する校正情報と、工作機械上で工作物に合わせた計測経路を設定するため、CAT を利用して計測用の CNC プログラムを自動作成する手順を構築している。E₆ は同様の仕組みを用いて、ケーシングのインレット部とよばれる深穴の寸法に対し、延長治具を用いて工具を装着した状態でのインライン計測を特徴とする。これらの仕組みは、可搬型マイクロメータなどと比べて高い繰り返し精度を有することで品質保証に寄与し、手動による調整作業の負荷を軽減できる。前述のように、「断続型」の運転における設備停止時間の削減に効果的である。

2.4 結言

生産品質の向上を目的とした大型精密部品の加工・計測システムに着目し、多品種少量生産品の製造工程の特徴を考慮して、システムの展開戦略を明確化した。また、蒸気タービン発電機の製造工程を対象とした検証を行った。結果を以下にまとめると。

- 1) 生産品質を確保するための枠組みと技術水準を設定した。大型精密部品においては、先端的な信号処理法やマルチセンサ融合に基づく加工監視、およびマルチセンサ協調を利用したトレーサブルなオンマシン計測の重要性が高いことを導いた。
- 2) 加工監視・オンマシン計測のシステム化において、システム稼働を効率化するために製造工程の時系列の特徴を最大限に活用した配置方針を示した。また、連続型と断続型の稼働状態を想定した場合に、システム導入によって得られる効果を明らかにした。
- 3) 蒸気タービン発電機の製造工程において加工・計測システムを実装し、各技術水準に対応する機能を検証した。これらの枠組みは将来的に高度なモデル化技術・予測技術との連携によって発展する特性を指摘し、本論文で対象とするシステムの位置付けを定義した。

参考文献

- [1] Jemielniak K. Commercial Tool Condition Monitoring Systems. *Int J Adv Manuf Technol* 1999;15:711–21.
- [2] Tang XQ, Davies BJ. Integration of inspection planning system and CMM via DMIS. *Int J Adv Manuf Technol* 1995;10:422–6.
- [3] Chang HC, Lin AC. Automatic inspection of turbine blades using a 3-axis CMM together with a 2-axis dividing head. *Int J Adv Manuf Technol* 2005;26:789–96.
- [4] Denkena B, Köller M, Bertram O. Teachless Process Monitoring for Single Part Production. 1st Jt Int Symp Syst Intell 2012 2012:117–9.
- [5] Denkena B, Krüger M, Schmidt J. Condition-based tool management for small batch production. *Int J Adv Manuf Technol* 2014;74:471–80.
- [6] Wilhelm RG, Hocken R, Schwenke H. Task Specific Uncertainty in Coordinate Measurement. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2001;50:553–63.
- [7] EC FP7 CP 213855 Adaptive Control of Manufacturing Processes for a New Generation of Jet Engines – ACCENT. 2008.
- [8] Altintas Y, Brecher C, Weck M, Witt S. Virtual Machine Tool. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2005;54:115–38.
- [9] Armendia M, Peysson F, Euhus D. Twin-Control : A New Concept Towards Machine Tool Health Management. *Eur Conf Progn Heal Manag Soc* 2015;1–7.
- [10] Altintas Y, Kersting P, Biermann D, Budak E, Denkena B, Lazoglu I. Virtual process systems for part machining operations. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2014;63:585–605.
- [11] OEE Foundation
<http://www.oefoundation.org>
- [12] Stamatidis DH. The OEE Primer: Understanding Overall Equipment Effectiveness, Reliability, and Maintainability. Productivity Press; 2010.
- [13] Pomorski T. Managing overall equipment effectiveness [OEE] to optimize factory performance. 1997 IEEE Int. Symp. Semicond. Manuf. Conf. Proc. (Cat. No.97CH36023), IEEE; 1997, p. A33–6.
- [14] Jauregui Becker JM, Borst J, van der Veen A. Improving the overall equipment effectiveness in high-mix-low-volume manufacturing environments. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2015;64:419–22.
- [15] Weckenmann A, Estler T, Peggs G, McMurtry D. Probing Systems in Dimensional Metrology. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2004;53:657–84.

- [16] Mehta P, Werner A, Mears L. Condition based maintenance-systems integration and intelligence using Bayesian classification and sensor fusion. *J Intell Manuf* 2013;26:331–46.
- [17] He X. Recent development in reliability analysis of NC machine tools. *Int J Adv Manuf Technol* 2015;85:115–31.
- [18] Gao R, Wang L, Teti R, Dornfeld D, Kumara S, Mori M, et al. Cloud-enabled prognosis for manufacturing. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2015;64:749–72.

第3章 時間周波数解析によるインプロセスびびり振動検知

3.1 緒言

1.2.1 で述べたように、動的特性のインプロセス計測は、生産品質に直結する最も重要な課題のひとつである。特に、製造工程が長時間におよぶ大型部品では、切削プロセスの状態を実時間で正確に推定する加工監視システムが求められる。

加工監視においては、物理量を検知するセンサの種別に加え、適切な信号処理法の選定が求められる。信号処理は、事前処理 (Preprocessing), 特徴抽出 (Feature extraction), 特徴選定 (Feature selection) の 3 つの段階から構成され、加工状態と関連性の高い特徴量が決定される[1]。本論文の主題である多機能な加工監視を実時間で行うため、本章では、びびりや工具破損の兆候が信号に含まれることを仮定し、時間周波数解析による特徴抽出を活用してインプロセスびびり検知法の開発に取り組むこととした。Fig. 3-1 は信号処理の流れにおける本提案の位置付けを示している。時間周波数領域における特徴抽出の新たな手法を提案することで、高精度なびびり検知を実現するものである。前述のように、加工監視の分野においても、プロセスに時間的変動が伴う場合に、短時間フーリエ変換 (Short-time Fourier transform ; STFT) やウェーブレット変換などの時間周波数領域の手法が用いられるようになったが、特徴抽出が効果的に利用されている事例はまだ少なく、複合的な異常要因を処理する機能は備わらない点が課題である。一方で、回転機械の故障診断の分析においては、時間周波数解析が特徴抽出に積極的に利用されてきた[2]。特に 2006 年に Antoni らが定式化したスペクトル尖度 (Spectral kurtosis ; SK) は、劣化した回転機械の振動信号に含まれる衝動性 (Impulsiveness) の高い成分を検知・フィルタ処理する場合に用いられ、故障診断の高度化に貢献してきた[3]。例えば、比較的長い時間軸の劣化傾向における異常の兆候を捉える場合、Fig. 3-2 に示すように STFT に基づいて計算した SK を指標とすることができます。切削プロセスのように、きわめて短時間で状態遷移が発生しうる場合でも、このような手段による過渡事象の分類は効果的と考えられる。しかし、加工監視の分野では、時間周波数法に基づく特徴抽出を発展させた事例はまだ少なく、基礎的な実験検証にとどまっている。そこで本章では、STFT と SK を組み合わせた演算によってびびり振動と過渡事象を効率的に分類し、そのエネルギーを指標とすることで、インプロセスで異常判定を行う方法を提案する。実験検証は蒸気タービンロータの穴あけ工程で実施した。産業用途では、一定の切削条件でドリル加工を行うような場合[4]でも、工具・工作機械・工作物に関する動的特性が変化する可能性があり[5]、インプロセスのびびり検知法は、びびり安定性解析が十分に展開されていない製造現場に特に効果的であると考えられる。3.2 では対象とする深穴ドリル加工の動的モデルを示し、3.3 で信号処理法を提案したあと、3.4 で実際のプロセスにおける異常事象との対応付けを行い、さらに長期間の運用を想定したシステムの妥当性を検証する。

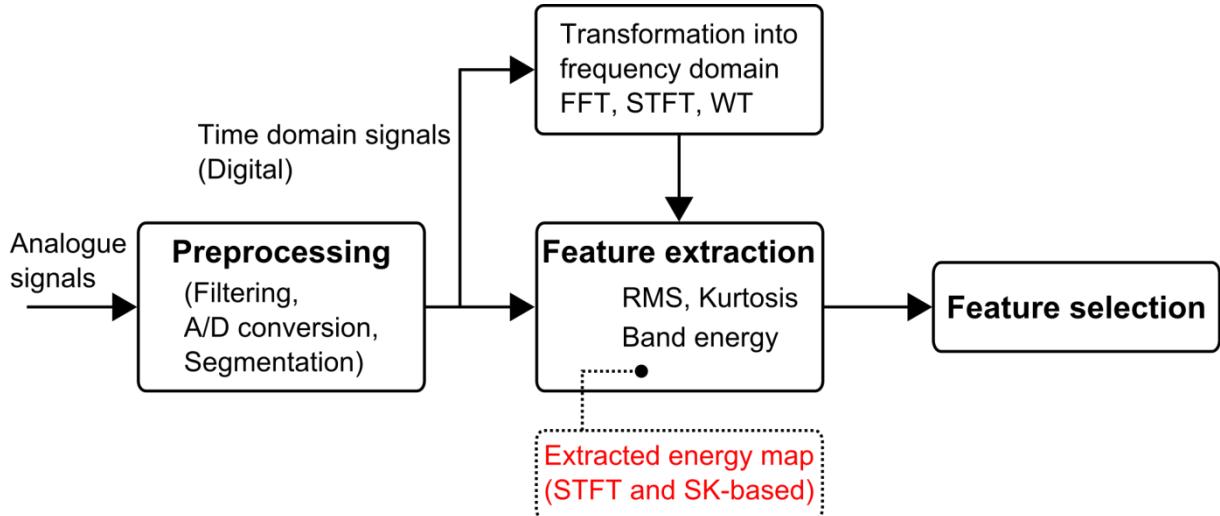


Fig. 3-1 Signal processing flow for monitoring machining processes by Teti [1].

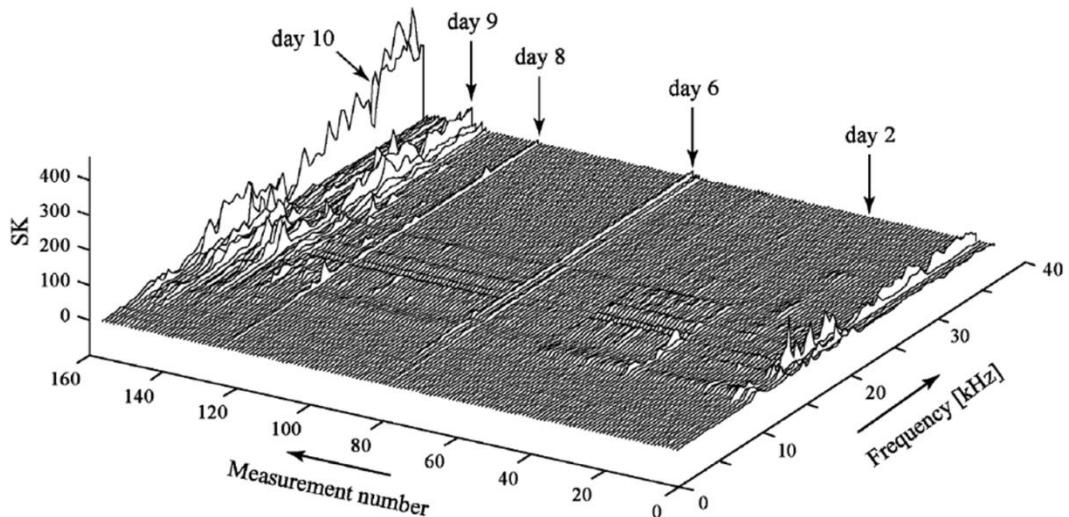


Fig. 3-2 SK of measurements on a gearbox submitted to an accelerated fatigue test [3].

3.2 精密ドリル加工

3.2.1 びびり振動のモデル

精密深穴加工では、穴径に対して非常に長い工具長をもつドリルが使用される。Fig. 3-3 に示す一般的な深穴加工用のねじれ刃ドリルを考える場合、最も単純な動的モデルは均一断面を仮定した Euler-Bernoulli 梁とみなすものであり、両端支持条件の固有振動数は、次式で表される[6]。

$$\omega^* = \frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (3-1)$$

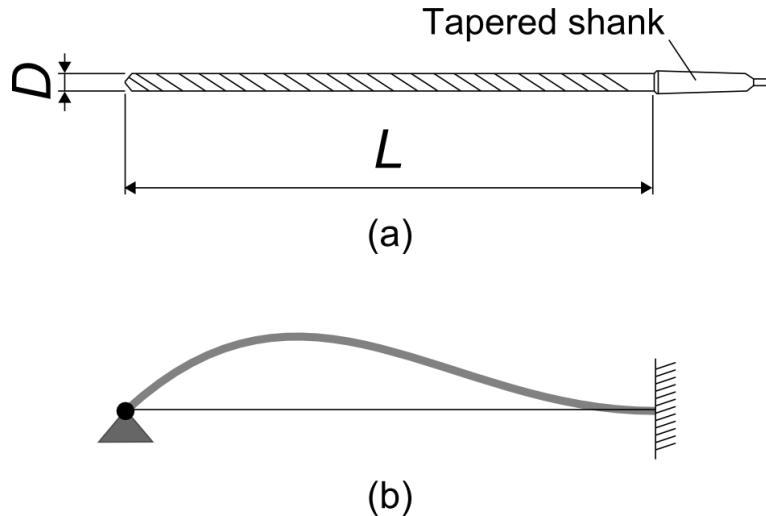


Fig. 3-3 Geometry of a long drill used for deep-hole drilling: (a) drill bit with tapered shank; (b) fixed-pinned condition of Euler-Bernoulli beam in first bending mode. D and L represent the diameter and length of the drill, respectively.

ここで, E は縦弾性係数, I は慣性モーメント, ρ は密度, A は断面積である. Ulsoy ら[7]は, 溝付きドリルの等価質量と慣性を考慮し, 集中荷重モデルを用いて横方向(軸に垂直な方向)の動きを調べた. それ以外の支持条件における固有振動数も解析的に求められ[6], 片端固定-片端自由では $\omega_{n1} = 0.356\omega^*$, 片端固定-片端支持では $\omega_{n2} = 1.562\omega^*$ となる. 一般にミーリング工具は片端自由として扱えるが[8], ドリルの幾何形状は刃先の位置を拘束する点に注意する必要がある. Ema ら[9][10]は, 深穴用ドリルの固有振動数と曲げ振動の周波数がよく一致することを実験的に示した. ω_{n2}/ω_{n1} の理論値 4.39 に対して, 実験値は約 2.5 であったため, 彼らは加工中のドリルの刃先は支持状態に近いことを明らかにした. 彼らはさらに, 再生効果, プロセスダンピング, 等価曲げ剛性に関する非線形ばね特性 (Soft spring characteristic), および系の減衰を考慮し, 集中荷重モデルを仮定してドリル加工系を以下の遅延微分方程式 (Delay-differential equation) で表した.

$$\ddot{y} + \omega_{n2}^2 y = \left\{ -\eta_1 \left[y(t) + y\left(t - \frac{T_0}{2}\right) \right] - \eta_2 \frac{\dot{y}}{2\pi N} + \eta_3 y^3 - \eta_4 \dot{y} \right\} \omega_{n2}^2 \quad (3-2)$$

$$\omega_{n2} = \sqrt{\frac{k_2}{m}} \quad (3-3)$$

ここで, y は横方向の変位, η_1 および η_2, η_3, η_4 は係数, T_0 はドリル刃の通過周波数, N はドリルと工作物の相対的な回転数, k_2 は等価曲げ剛性, m は等価質量である.

再生効果は, 1回転前に加工した表面と現在の工具位置の間の変動に起因し (1.2.1) , 式 (3-2) の右辺第1項に対応する. また, α および β を定数, V_B を逃げ面摩耗量とすると, 係数は $\eta_1 \propto \alpha e^{V_B}$, および $\eta_2 \propto \beta V_B$ の関係を含んでいることに留意すべきである[11]. η_4 によって支配される系の減衰を精度よく見積ることは難しいため[10], ここでは再生効果の

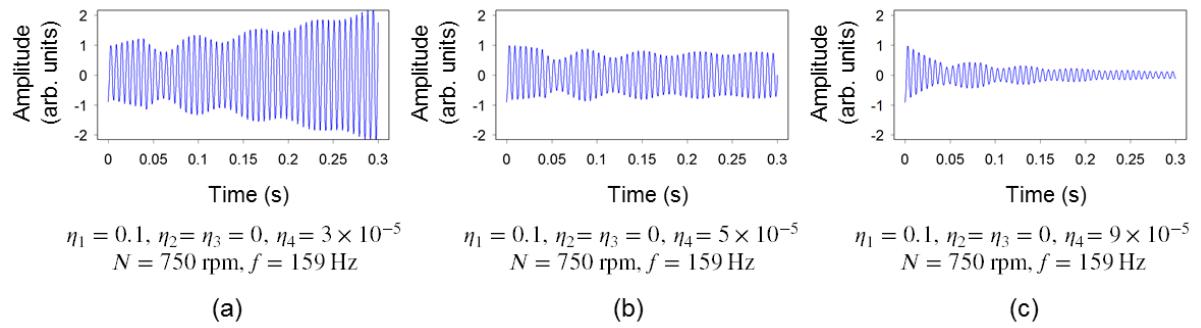


Fig. 3-4 Simulated regenerative chatter vibrations during drilling for various damping coefficients: (a) amplified oscillation; (b) undamped oscillation; (c) damped oscillation.

影響を定性的に示すのにとどめる。簡単のためプロセスダンピングと非線形形ばねの効果を無視し($\eta_2 = \eta_3 = 0$)、再生振動における振幅の時間変化の代表的例をFig. 3-4に示す。 η_1 が一定の場合でも、減衰の影響で振幅は大きく変わることがわかる。このように簡略化した再生効果のシミュレーションでは、摩耗の進行がびびり振動をもたらすが、その発生予測は難しい。さらに実際のドリル加工では、貫通させる過程で振動数が増加することが知られている[12][13]。ドリルと穴壁面の相互作用と変動する境界条件に関する議論がなされているが、びびり周波数を正確に特定する方法には依然として課題がある。

3.2.2 蒸気タービンロータの穴あけ工程

前項では深穴用ドリルの一般的な運動を記述した。実際のプロセスを検証するため、高アスペクト比の精密穴加工が求められる、全長約 10 m の蒸気タービンロータを工作物に選んだ。ロータの製造工程をFig. 3-5(a)に示す。ホイールとフォーク型植え込み溝を旋削で形成させたあと、羽根(Blade)固定用ピンを挿入するための深穴貫通加工を行う。これを下穴として羽根を仮組み立て状態とし、リーマ工具によって仕上げ加工を施す。形状はロータの仕様に応じて、穴深さ 130 mm ~ 370 mm、穴径 7 mm ~ 18 mm から選択される。フォーク型溝の部分には、穴の円筒度と位置精度を確保するためのブッシュ群からなる治具が挿入された状態で加工が行われる。工作機械はFig. 3-5(b)に示すように多軸穴加工と加工監視の機能を備えた状態で、実験に用いた。この工作機械は主軸と可換型ドリルヘッドとの組み合わせにより、さまざまな穴配置(半径・円周方向の穴ピッチ、直径、深さ)を可能とし、一品生産や少量生産の製品仕様に対応する。ヘッド内の歯車によって単一の主軸ユニットの回転が複数のドリルに伝えられる。同時に用いるドリルの径は、通常互いに異なる。制御ユニットはドリルの切込みを与える Z 軸の送り動作、主軸回転を制御するとともに、振動計測に基づいた異常発報を受けて、緊急停止する機能を有する。ドリル加工における振動現象は複合的な要因が含まれるため、信号の統計的特性を考慮して要素を分類し、びびりや工具損傷と関連の強いエネルギーに着目して加工監視システムを構築することが求められる。3.3 では信号処理法の仕組みを提案し、3.4 で製造工程におけるシステムの検証を行う。

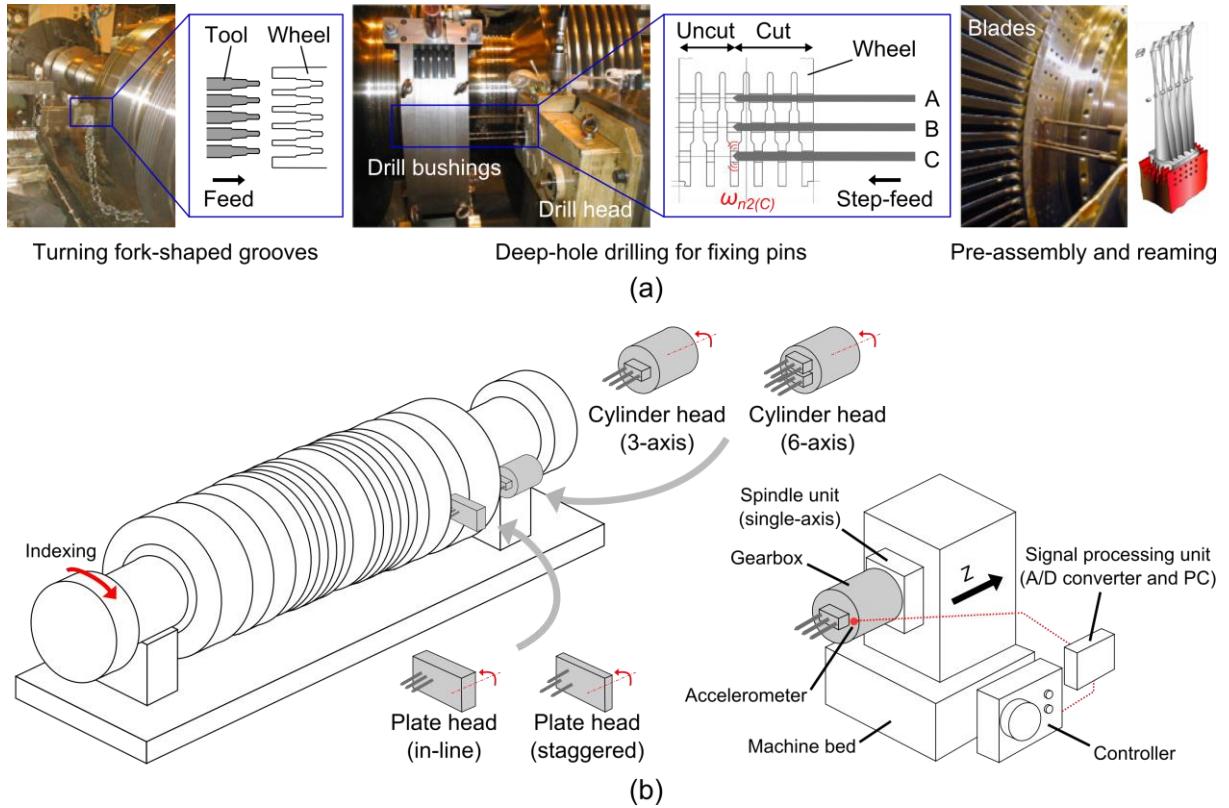


Fig. 3-5 Manufacturing procedure for a steam turbine rotor: (a) illustrations of manufacturing steps; (b) schematic diagram of multi-axis deep-hole drilling system for fixing pins.

3.3 加工監視システムの信号処理

回転機械の故障診断においては、標準偏差、平均自乗平方根、歪度 (Skewness)、尖度 (Kurtosis) などの統計的パラメータが用いられてきた。周波数領域に関しては、特定の周波数帯のエネルギーによって工具摩耗を予測する手法があるが、工具の折損およびチッピング、衝突、減衰振動のような過渡的信号が混在する場合は、所望の現象を検出できないおそれがある。一方で、時間周波数領域の表現を用いると、過渡信号に関する豊富な情報を含めることができる。これに対し Obuchowski ら[14]は、信号処理による特徴抽出や意思決定を行う前に、時間周波数表現の可読性の向上が効果的であることを指摘した。彼らは軸受や歯車の局所的な損傷の診断のため、STFT のスペクトログラム (周波数スペクトルを計算し、時間・周波数・信号成分の強度を 3 次元的に表現したグラフ) における、衝動性の高いエネルギーの振る舞いを強調する信号処理法を提案した。切削プロセスの事例では、Axinte ら[15]により、時間周波数表現から切削に寄与する AE 信号を抽出したエネルギー要約図 (Condensed energy map) を作成することで遷移状態の見通しを向上させ、対象周波数帯 (Target frequency band ; TFB) の監視によって工具状態が推定できることが示された。STFT に基づく SK を定式化した Antoni らが指摘しているように、SK 単独では異常に関する診断情報を含まない[3]ため、さらなる実験検証が求められる。

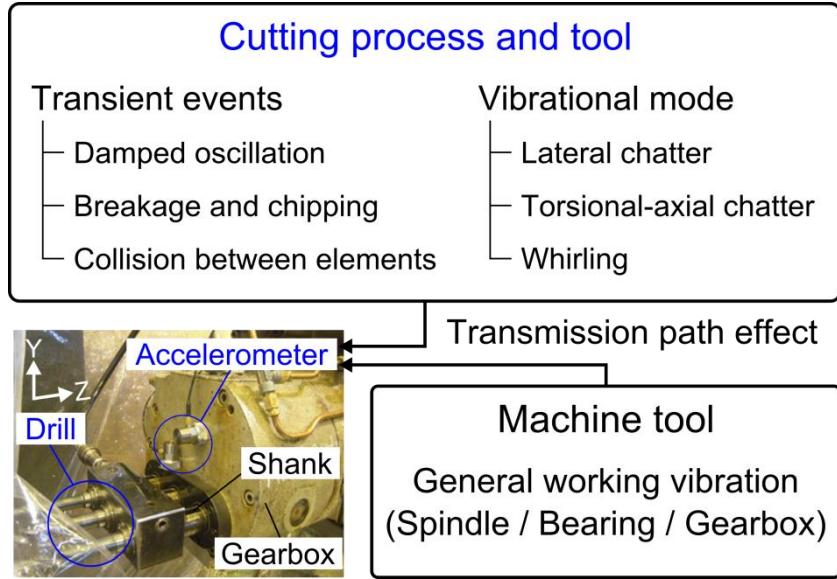


Fig. 3-6 Measurement setup and factors that can affect measured signals.

ここで、多軸ドリル加工における段取りを説明する。Fig. 3-6 は実験段取りと加速度計で計測される信号に含まれうる因子を示しており、過渡事象と振動モードの影響を明らかにすることでドリルの状態を推定することを仮定している。前述のように横方向のびびり振動が優勢とみられるが、過渡事象にはさまざまな加工現象が含まれる可能性がある。提案手法の概念を Fig. 3-7 に示す。工具通過周波数と同期した衝動性の信号のうち、びびりが発生して工具損傷に至るまでの仮想的な信号を例示している。この信号にはプロセスに起因する振動のほか、工作機械の運転に関わる振動やそれらの伝達経路の影響を受けるが、ここではガウス性の雑音が重畠されるものとした。提案手法では、まず時系列信号 $x(t)$ に対して、次式で示されるように、STFT により時間周波数表現へ変換する [16]。

$$STFT(t, f) = \sum_{n=t}^{t+N_w-1} h(n-t)x(n)e^{-j2\pi fn} \quad (3-4)$$

ここで、 $h(t)$ は窓関数、 N_w は STFT の処理を行うデータ長である。データ長によって時間分解能と周波数分解能が規定される。Fig. 3-7 の STFT の振幅スペクトルでは、要素の最大値を基準として規格化しており、過渡事象に対応する広い周波数帯でのエネルギー、びびり振動の周波数の極大点が認められる。TFB はドリルの固有振動数に基づいて決定する。また、SK は振動信号の衝動性を強調するために導入する。SK の算出に用いる単位処理時間 Δt は、工具刃先の通過周期と同程度のオーダとすることを考慮に入れ、びびりの開始と進展を認識できる十分に小さい時間である数 100 msec 程度に設定する。任意の周波数 f に対する SK を STFT に基づいて計算する場合は、次式のようになる [17]。

$$SK(f) = \#T \frac{\sum_{t \in T} |STFT(t, f)|^4}{(\sum_{t \in T} |STFT(t, f)|^2)^2} - 2 \quad (3-5)$$

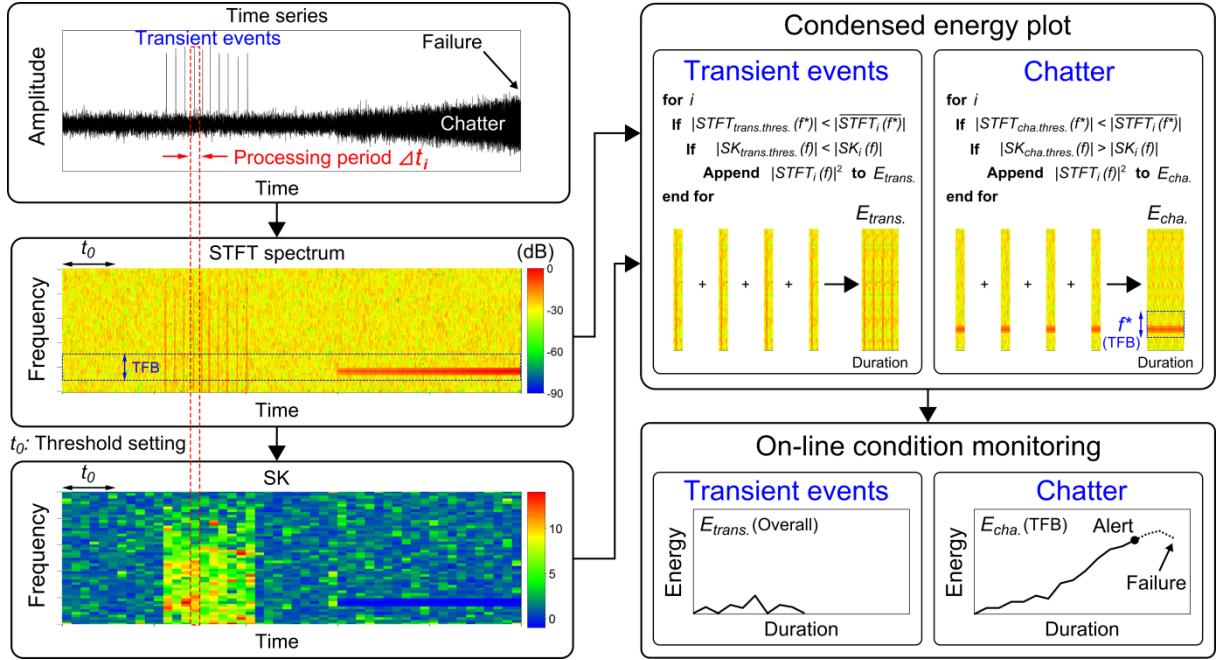


Fig. 3-7 Flowchart for proposed on-line condition monitoring technique. Synthetic signals that include chatter and transient events are shown. STFT amplitude spectrum is normalised by the maximum value.

ここで、#Tは処理時間 Δt におけるSTFTのサンプル数である。処理後のSKをFig. 3-7に併記した。過渡事象が発生している間に高いSK値を得ており、狭帯域の調和振動が優勢となるびびり時には低いSK値となる。これらの処理を実時間で行いながら、信号が過渡事象またはびびりに相当する場合は、それぞれのエネルギー要約図として抽出する。この際、STFTのTFB区間およびSKをベクトルとみなし、両者のベクトル長に対して統計的な有為水準に基づいて設定した閾値を基準として、過渡事象(Transient events)またはびびり振動(Chatter)への分類判定を行った。なお、閾値はプロセスの雑音の水準を考慮し、プロセス開始直後の一定の初期時間内(t_0)で決定する。実際の深穴加工では1箇所あたり数十分を要するため、その場でのデータ処理と異常を未然に防ぐ対策が求められる。そこで、実時間で抽出した過渡事象とびびりに関するエネルギー要約図を用いてプロセスの状態を定性的に把握するとともに、Fig. 3-7の右下に示すように、TFBに相当するびびりの部分周波数の要素を加算してエネルギー指標として監視することで、決定的な損傷を未然に防ぐ方法が考えられる。関連する検証実験は、3.4において蒸気タービンロータのドリル加工プロセスを通じて行う。

3.4 製造プロセスにおけるびびり振動検知特性の検証

3.4.1 システム構成と実験条件

実験には Fig. 3-5(b)に示す多軸ドリル加工機を用いた。工作物であるロータと工作機械の主軸との間の平行度を精密に調整したのち、ロータにはガイドブッシュ治具を挿入し、工作機械ではドリル加工ヘッドに備えられた工具ホルダに対して、ドリルのテーパシャンク部が挿入される。ロータは 3.5% Ni の鍛造素形材、ドリルの材質は高速度工具鋼である。加工条件を Table 3-1 に示す。各実験は刃先が研磨された状態から開始した。ドリルの固有振動数は、Ulsoy と Tekinalp によって提案されたモデル[7]より推定している。横方向びびりを確実に検出するため、TFB は実験で使用する複数のドリルの固有振動数を包含するように範囲を指定する。また、ドリルと壁面の相互作用による周波数シフトの可能性を考慮に入れ、実際にはやや広めの TFB (100-300 Hz) を設定した。これは、前述のように逐次変動する境界条件の影響を受けるためである。1 軸方向の感度をもつ圧電式加速度計 (Rion PB-85) は Fig. 3-6 に示すようにマグネットベースを介してドリルヘッド上の Y 軸方向に設置した。加速度信号はチャージコンバータ (Rion VP-40) で電圧信号に変換し、A/D 変換器 (National instruments NI 9234) に入力した。取得した信号は PC 上のソフトウェアで実時間処理とデータの蓄積が行われる。計測条件と信号処理のパラメータを Table 3-2 に示す。動的挙動を分析するため、TFB に対して余裕をもつことを考慮して解析周波数を 1 kHz に設定し、時系列のサンプリングレートを 2.56 kHz に決定した。STFT の処理時には 75% のオーバラップによるハニング窓を用いた。STFT の解析長を決定する際には、時間と周波数の分解能がトレードオフの関係にある（時間分解能を高めると周波数分解能が低下する）ことに注意する。STFT 解析長が 128 の場合は、周波数分解能は 20 Hz、時間分解能は 0.0125 s となる。この条件は TFB 付近でのびびり特性の判定が可能で、かつ数 100 rpm 程度の主軸回転数で発生しうる過渡事象を検知するのに十分な STFT の時間軸分解能を選定している。3.3 で述べたように、SK の処理時間は工具刃先の通過周波数と同程度の長さで、びびりに伴う決定的な劣化が進展する前に工具状態の推定が行えることを基準に設定している。ねじりによるびびり振動 (Torsional-axial chatter) などの数 kHz におよぶより高速な現象を対象とする場合は、計測条件の見直しが必要となるが、処理の手順自体は本実験以外のドリル加工条件においても適用することができる。

Table 3-1 Cutting conditions for experiment P, Q, and R.

Drill length (mm)	380
Diameters of drills A, B, and C (mm)	10.5 / 13.0 / 14.5
First bending mode of fixed-free beam, ω_{n1} (Hz)	42 / 52 / 57
First bending mode of fixed-pinned beam, ω_{n2} (Hz)	183 / 226 / 252
Depth of holes (mm)	264
Step feed (mm)	6
Feed rate (mm/min)	30
Tool rotation (rpm)	330
Head type	Inline 3-axis cylinder head

Table 3-2 Measurement conditions.

Maximum sample rate of A/D converter (Hz)	51200
Measurable range of accelerometer (Hz)	1–7000
Sample rate (Hz)	2560
STFT length, N_w	128
Frequency resolution of STFT (Hz)	20
STFT overlap (%)	75
Window function	Hanning
Processing period of SK, Δt (s)	0.3

3.4.2 工具状態遷移の評価

提案手法によって損傷と対応付けて分析するため、実験 P として寿命試験を行った。10 群（合計 30 個）の穴加工が安定状態で推移したのち、11 群目（P₁₁ とよぶ）の加工途中に作業者が異常な振動状態を検知して装置を停止させ、ドリル A にかじり（焼き付き）損傷が認められた。時系列は工具が回転を開始してから常時記録し、それらを解析した結果を Fig. 3-8 に示す。ドリル加工は段階的切り込み動作を行うため、切削と退避動作を繰り返すが、安定した切削条件に調整されているためプロセス起因の振動は工作機械の雑音の水準と同等と考えられ、ほとんどの時間帯で低い振動水準に収まる傾向が見られる。しかしながら、Fig. 3-8(b)および(d)に示すように部分的にびびりに対応する振幅の増加が認められ、STFT でその周波数の推移を明らかにしている。加速度信号により、非定常かつ周期性のあるびびり状態 (CV1, CV2) への急激な遷移が観測された。びびりの開

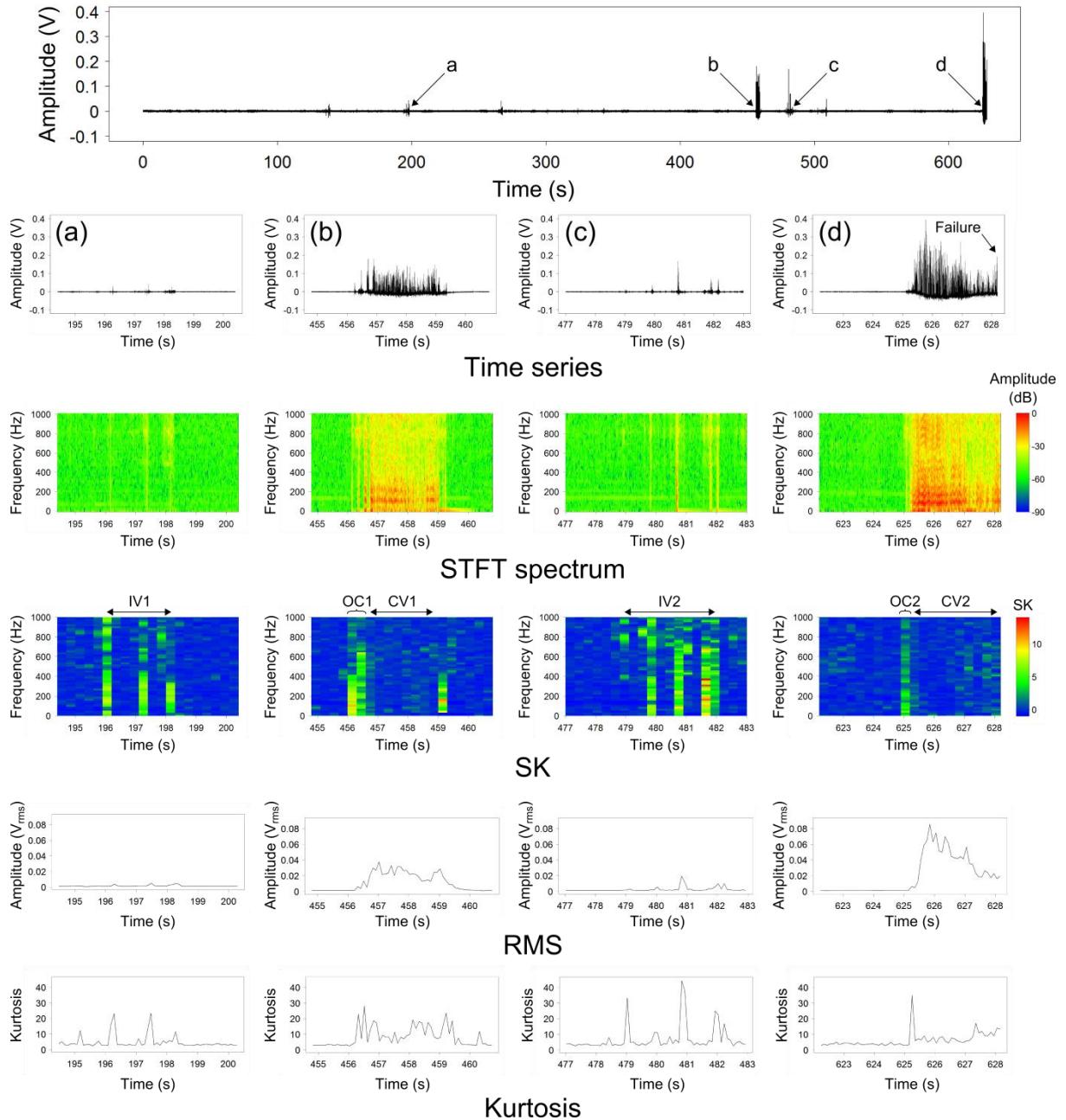


Fig. 3-8 Time series, STFTs, and SK values of signals before tool failure (during the 11th process of experiment P: P_{11}): (a) impulsive small-amplitude vibrations; (b) chatter; (c) impulsive large-amplitude vibrations; (d) tool failure occurring during chatter. IV, OC, and CV represent impulsive vibration, onset of chatter, and chatter vibration, respectively. Conventional criteria for time series (RMS and kurtosis of 0.1-second intervals) are also shown for comparison.

始時には、衝動的な変動が起点となる傾向を確認でき、SK が増加を示している (OC1, OC2)。びびりは摩耗の増加によって開始する本質的な性質があるものの、Fig. 3-8 では状況によって発生後に消滅する場合も認められる。このように、ドリル、ガイドブッシュ、加工穴の壁面を含むドリル加工系の減衰と、再生効果に関する平衡は 3.2.1 で例示したように変動の影響を受けやすいものと考えられる。また、Fig. 3-8(a)および(c)では、Fig. 3-8(b)および(d)に比べ高い SK を示している。SK は統計的に非ガウス性を表すことから、損傷の兆候となりうるこれらの微小振幅の過渡事象 (IV1, IV2) に対しても、エネルギー要約図として抽出している。一方で RMS や尖度などの一般的な統計パラメータについても、Fig. 3-8 に併記した。RMS はびびり振動のエネルギー遷移を適切に表しており、尖度は十分な感度で過渡事象を認識している。しかし、尖度により信号を分類する場合、SK を利用する方法と比べて、振幅が時間変動する周期信号を認識することが難しい。これは Fig. 3-8(b) のびびりにおいて尖度が高い値を示すことに対応する。実際の製造工程におけるドリルのびびりはこのような複雑な挙動を含むため、STFT と SK を組み合わせることで、過渡事象とびびり振動に関連する情報を抽出する手法が効果的であることがわかる。

時間周波数表現の可読性を高めて損傷との相関を見出すため、 P_{11} の時系列信号より Fig. 3-9(a) に示すエネルギー要約図を抽出した。横軸は過渡事象とびびりの継続時間 (Duration) を表す。この場合、びびりは過度な工具摩耗によって引き起こされ、折損に至るまでのエネルギー量としても優勢である。これはドリル材質であるハイス鋼 (High-speed steel ; HSS) が超硬合金と比べて韌性が高く、突発的なチッピングなどの異常が抑制されていることが要因のひとつと考えられる。ドリル加工で生じうる振動モードである横方向びびり、ねじりによるびびり、および旋回振動 (Whirling) のうち、ねじりの固有振動数は横方向よりはるかに高い領域であり [18]、旋回振動は工具刃先の通過周波数の倍数である低い領域となることから、本実験でのびびりは横方向のモードが支配していると考えられる。さらに、横方向の 1 次振動モードは片端固定・片端自由の 1 次曲げモードと対応し、横方向の 2 次振動モードでは片端固定・片端支持の 1 次曲げモードと対応する [18]。TFB の近傍におけるびびりエネルギーの周波数成分を Fig. 3-9(b) に示す。100 Hz および 180 Hz 付近のピークはドリル A の 1 次および 2 次の横方向の固有振動数の間に位置する傾向にあった。ただし損傷が発生したのはドリル A のみであるが、ドリル B および C の影響はここでは明らかにはなっていない。次に STFT 処理後の単位信号のエネルギーとして周波数領域における総和を求め、状態遷移を表す評価基準とした例を Fig. 3-9(c) に示す。びびりの進展によるエネルギーのピークを迎えたあとに損傷が発生していることから、この指標で長期間の加工におけるエネルギー推移を追跡し、異常現象に対する予防の可能性を検証する。

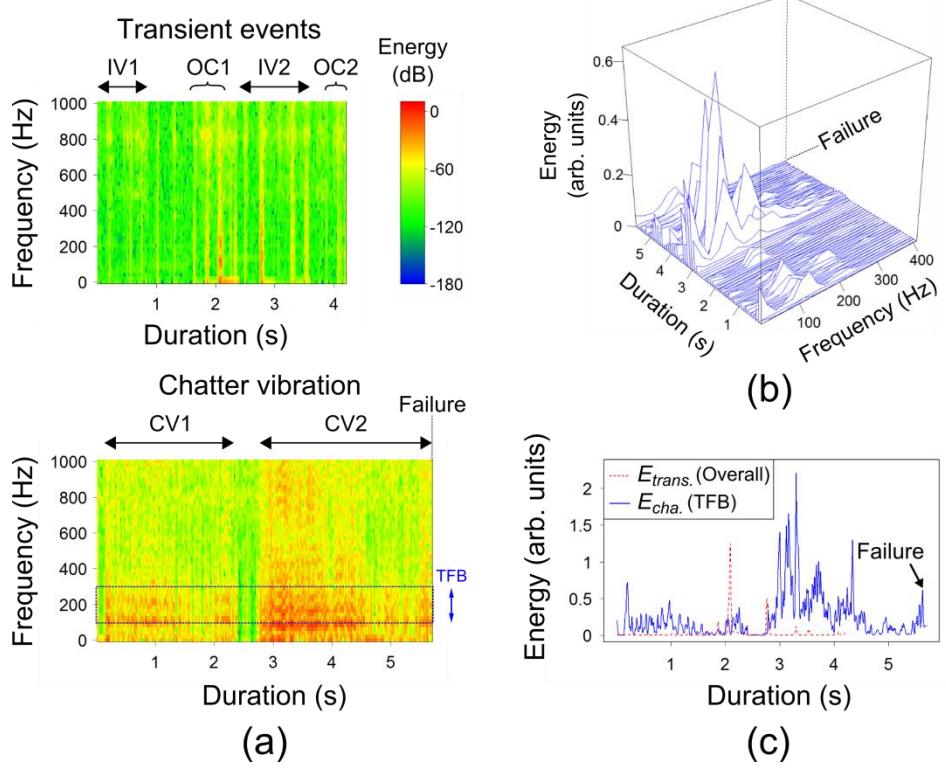


Fig. 3-9 P_{11} results: (a) extracted energy map relevant to transient events and chatter vibration; (b) chatter energy transition near TFB (averaged energy of 0.1-second intervals); (c) energy transitions for transient events and chatter vibrations. IV, OC, and CV have the same meanings as in Fig. 6.

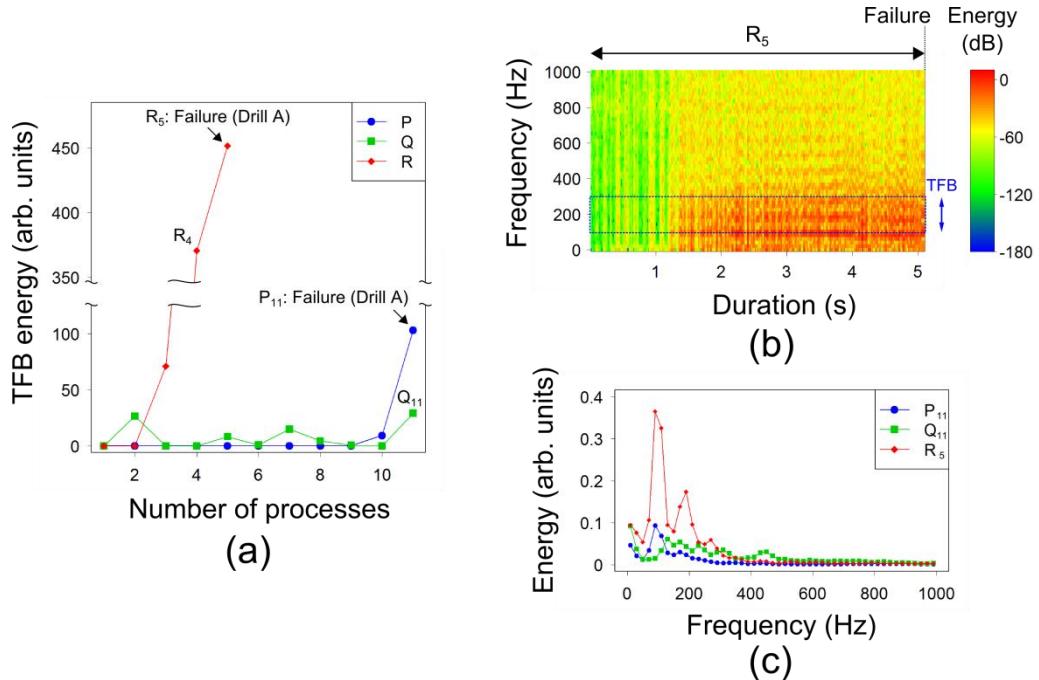


Fig. 3-10 Results for experiment P, Q, and R: (a) chatter energy transition with respect to the number of processes; P_{11} and R_5 result in tool failure, whereas Q_{11} ends in normal wear; (b) extracted energy map for R_5 ; (c) comparison of averaged frequency contents in the chatter state for each experiment.

3.5 考察

11群の穴加工を連続的に実施した実験 P のびびりエネルギーの履歴を Fig. 3-10(a)に示す。エネルギーは TFB における要素値の総和とし、3.4.2 で述べたように 10 群の加工のうち 11 群目の途中で急激な状態遷移の直後に損傷に至った。実験 Q および R は同様の加工条件の別試行であり、Fig. 3-10(a)に結果を併記した。実験 Q では、エネルギーの一時的な上昇は見られるものの、連続した 11 群の加工 Q_{11} を終えた段階でも、ドリルは通常摩耗の水準であった。すなわち、 P_{11} と Q_{11} の中間に暫定的な閾値を設けて工作機械に警告を出すことが考えられる。これに対し、実験 R では第 5 群目の R_5 の加工途中において、びびりが継続したあとにドリル A が折損する結果となった。 R_5 におけるエネルギー図を Fig. 3-10(b)に示す。ピークが生じる周波数は P_{11} と同様であるが、Fig. 3-10(a)で明らかなようにびびりの総エネルギーは R_5 がより大きい。仮にインプロセスでの判定の仕組みを有効化していた場合、 R_4 の水準のエネルギーを検知した時点で安全に停止できたものと思われる。実験 Rにおいては、刃先の再研磨状態などの影響を受けて、早期に摩耗が進行してびびりに遷移したと推測される。実験 P, Q, R のびびり時の平均化した周波数成分を Fig. 3-10(c)に示す。1 次および 2 次の横方向振動モードに対応する 2 つのピークが R_5 にみられ、折損による工具寿命までびびりが継続しており、これは P_{11} の継続時間の後半と同様である。実験 Q の周波数成分には明瞭なピークがないが、TFB 付近の定常的なエネルギー増加を示した。この状況では決定的な損傷は発生しなかった。加工監視システムを適用した場合に生産品質を保証するためには、エネルギー要約図や実際の損傷事象との関係をさらに詳細に分析することが求められる。

このように、提案したエネルギー指標によって、長期間におよぶ製造プロセスでの工具損傷の前に、異常の兆候を検知できる可能性を示した。したがって、複雑な動的挙動の特徴抽出をインプロセスで行う提案手法は、生産品質の保証に貢献すると考えられる。さらに最終仕上げ工程での工具損傷を完全に防止したい場合は、より信頼性の高い加工監視システムとして、マルチセンサ融合のような施策を加える可能性がある。例えば、AE の計測は工具状態の劣化や表面性状に関する包括的な情報をもたらす。さらに、工具の寿命時間 (Remaining useful life ; RUL) を推定する手法[19]や、多変量制御チャートのような統計的プロセス管理法[20]と提案手法を組み合わせて活用することも考えられ、今後のシステムの改良に考慮すべき項目である。

3.6 結言

大型精密部品の生産品質を保証するため、インプロセスびびり検知に関して新たな信号処理法に基づく加工監視システムを提案し、蒸気タービンロータの深穴ドリル加工での実験によって検証した。STFTとSKを組み合わせた時間周波数分析を利用することで過渡事象とびびり振動に関する情報を加速度信号より抽出し、工具状態の遷移特性を追跡することができた。実験では、びびりが振動エネルギーにおいて優勢であるだけでなく、工具の損傷をもたらす決定的な要因であった。ドリル加工の振動モードのうち、実験で確認されたのは、再生効果と減衰の影響を考慮した動的モデルから予測されるように、曲げモードの固有振動数で発生する、横方向びびりに対応することがわかった。提案手法では、長期の製造プロセスにおいてエネルギー指標を監視することで、工具損傷の前に異常の兆候を捉えられる可能性があった。今後の研究課題としては、ガイドブッシュ群や加工壁面の影響を考慮した動的モデルの開発のほか、工具への累積損傷の定量化などが考えられる。

参考文献

- [1] Teti R, Jemielniak K, O'Donnell G, Dornfeld D. Advanced monitoring of machining operations. CIRP Ann - Manuf Technol 2010;59:717–39.
- [2] Antoni J. The spectral kurtosis: a useful tool for characterising non-stationary signals. Mech Syst Signal Process 2006;20:282–307.
- [3] Antoni J, Randall RB. The spectral kurtosis: application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines. Mech Syst Signal Process 2006;20:308–31.
- [4] Weinert K, Webber O, Peters C. On the Influence of Drilling Depth Dependent Modal Damping on Chatter Vibration in BTA Deep Hole Drilling. CIRP Ann - Manuf Technol 2005;54:363–6.
- [5] Soliman, E.; Ismail F. Chatter suppression by adaptive speed modulation. Int J Mach Tools Manuf 1997;37:355–69.
- [6] S. G. Kelly, Advanced Vibration Analysis, CRC Press; 2006.
- [7] Ulsoy G, Tekinalp O, Lenz E. Dynamic Modeling of Transverse Drill Bit Vibrations. CIRP Ann - Manuf Technol 1984;33:253–8.
- [8] Altintas Y, Budak E. Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling. CIRP Ann - Manuf Technol 1995;44:357–62.
- [9] Ema S, Fujii H, Marui E. Chatter Vibration in Drilling. J Eng Ind 1988;110:309–14.
- [10] Ema S, Marui E. Theoretical analysis on chatter vibration in drilling and its suppression. J Mater Process Technol 2003;138:572–8.

- [11] Xiao W, Zi Y, Chen B, Li B, He Z. A novel approach to machining condition monitoring of deep hole boring. *Int J Mach Tools Manuf* 2014;77:27–33.
- [12] Dilley DN, Bayly P V., Schaut a. J. Effects of the chisel edge on the chatter frequency in drilling. *J Sound Vib* 2005;281:423–38.
- [13] Dilley DN, Stephenson DA, Bayly P V., Schaut AJ. Frequency Shift in Drilling due to Margin Engagement. *J Manuf Sci Eng* 2005;127:271–6.
- [14] Obuchowski J, Wyłomańska A, Zimroz R. The local maxima method for enhancement of time–frequency map and its application to local damage detection in rotating machines. *Mech Syst Signal Process* 2014;46:389–405.
- [15] Marinescu I, Axinte D a. A critical analysis of effectiveness of acoustic emission signals to detect tool and workpiece malfunctions in milling operations. *Int J Mach Tools Manuf* 2008;48:1148–60.
- [16] Combet F, Gelman L. Optimal filtering of gear signals for early damage detection based on the spectral kurtosis. *Mech Syst Signal Process* 2009;23:652–68.
- [17] Obuchowski J, Wyłomańska A, Zimroz R. Selection of informative frequency band in local damage detection in rotating machinery. *Mech Syst Signal Process* 2014;48:138–52.
- [18] Ahmadi K, Altintas Y. Stability of lateral, torsional and axial vibrations in drilling. *Int J Mach Tools Manuf* 2013;68:63–74.
- [19] Gao R, Wang L, Teti R, Dornfeld D, Kumara S, Mori M, et al. Cloud-enabled prognosis for manufacturing. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2015;64:749–72.
- [20] Messaoud A, Weihs C, Hering F. Detection of chatter vibration in a drilling process using multivariate control charts. *Comput Stat Data Anal* 2008;52:3208–19.

第4章 工具摩耗・加工表面性状のマルチセンサ融合型異常検知

4.1 緒言

1.2.2 で述べたように、大型精密部品の総合的な生産品質を保証するためには、複合的な工程を想定し、摩耗などの工具状態に加えて、製品の仕上げ加工面の状態まで対象を拡張した多機能な加工監視システムが望ましい。Table 1-1 のセンサ群の特長に現れていればおり、AE はこの目的に適合するが、欠陥のない製造を目指した仕組みを構築するためには、AE センサの特性を理解したうえで、以下の課題について検討する必要がある。

- (I) 工具摩耗・加工表面性状に関する異常現象と AE 信号の定量化
- (II) 大型工作機械を用いた複合的な工程に対する加工監視の枠組み

まず 4.2 で(I)および(II)の課題を整理したのち、マルチセンサ融合型の加工監視システムを提案する。4.3 以降では、蒸気タービンロータの溝入れ工程を取り上げ、大型工作機械に実装したシステムの妥当性を検証する。

4.2 マルチセンサ融合型加工監視システム

4.2.1 精密切削と AE

AE は切削と関連する変形・破壊・摩耗などに関するさまざまなスケールの現象を高い感度で捉えられるため[1]、加工監視の有力な手段のひとつである。発振器を用いて能動的に非破壊検査を行う超音波探傷法に対し、AE の検出は受動的であり、集音器と同じく現象を「聞く」行為となる。切削プロセスの AE を検出する場合、加工点の近傍に AE センサの検出面を固定する方式が多い。ただし、AE の発生源からセンサまでの伝達経路に依存した信号の減衰の影響を含む可能性がある。また、工作物や工具が回転する場合は、切削油などの流体を媒介した検出法も用いられる[2]。AE センサは 100~900 kHz を中心とする広帯域で感度をもち、原信号を処理するには膨大な記憶容量が必要になるため、Fig. 4-1 に示すようにアナログ信号の前処理を行うことで、安価な計算資源で処理できる特徴量に変換されることが一般的である[2]。

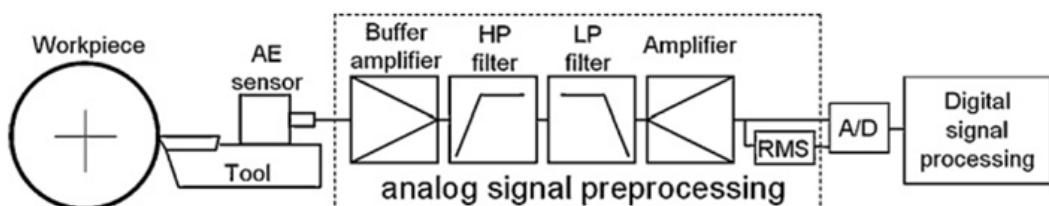


Fig. 4-1 Typical measuring chain for AE detection during machining [2].

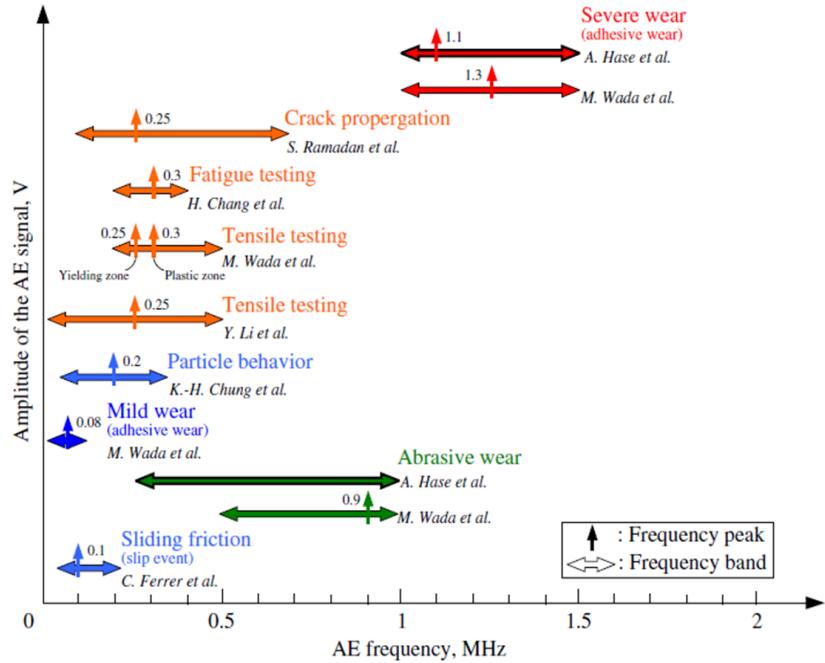


Fig. 4-2 Correlation map of AE frequency spectra [3].

次に、AE として検出される信号の振幅を定性的に考える。Hase ら[3]は、AE の要因別に周波数と振幅を整理し、Fig. 4-2 のようにまとめた。安定切削状態では塑性変形により 0.25-0.3 MHz の低周波にピークをもち、亀裂伝搬のような現象では高周波側に広がる特徴がある。また、アブレシブ摩耗 (Abrasive wear) では 0.25-1 MHz の間で比較的小さい振幅で現れる。一方、すべり摩擦面が接触・融着して焼き付いた状態になる、スコーリングのような強い凝着摩耗 (Severe adhesive wear) では、1-1.5 MHz の高い周波数で大きい振幅を発生する。このように、AE の周波数は機械振動や周囲環境の雑音の周波数 (~ 1 kHz) と比べて遙かに高く、原信号に対する適切なフィルタ処理を備えれば、工具摩耗や破壊に関連する情報を得ることができる。さらに近年では、AE 発生モデルの高度化[4]、波形の特徴抽出[5]、特徴量による意思決定アルゴリズム[6]などの研究も盛んであり、切削プロセスにおける破壊現象や工具摩耗のメカニズム解明に積極的に活用されつつある。

さらに、AE による加工監視機能の実装について取り上げる。Axinte ら[7]はミーリングの各刃先で発生する AE の実効的なエネルギーを時間周波数分析で算出することに加え、切削抵抗と AE に関する 2 次元図を用いて工具状態の劣化傾向と対応付けた。また、彼らは加工表面に切屑の巻き込みが観察される場合に、AE パルスの検出数が顕著に増加することを発見し、表面性状の異常 (Surface anomalies) を AE で捉えられる可能性を示した[8]。ただし、実験の手段として AE センサと工作物を一体で拘束する治具を用いており、AE の発生源とセンサの距離が変化するため、小型の工作物・工作機械に向く手法であった。大型工作機械の加工点近傍で安定して AE を取得するためには、回転工具とセンサの間に切削油を介して AE を検知する手法などが有力な候補となる。

4.2.2 異常検知における閾値

加工プロセスにおけるセンサ信号の質が確保された場合、閾値に代表されるシステムの管理方法が要点となる。マルチセンサ融合型のシステムでは、特徴量 (Signal feature ; SF) を複数用いてプロセスの状態を推定し、異常停止などの意思決定がなされるが、誤判定を含みうる枠組みでは、多品種少量生産に対し条件不整合の可能性を残してしまう。また大型精密部品の製造では、一度固定された加工条件や工具交換間隔を変更する根拠の導出にも課題を含んでいた。さらに、粗・仕上げのような複数の工程を想定すると、切削負荷が小さくなる仕上げ工程を含めて、包括的に異常を防ぐ枠組みが必要となる。そこで、多次元的な特徴量の分布と、プロセスの異常状態の関係を工程別に把握することをねらい、Fig. 4-3 に図示する閾値管理法を考える。例示した任意の特徴量 (SF_x と SF_y) が増加する方向を不安定条件とすると、安全率を考慮したプロセスの初期条件では、安定側に特徴量が分布する。大型部品を用いた実験検証には制約があるため、図中では試験片を用いたミーリング工具の寿命試験によって特徴量と異常状態の関係を明らかにし、工程別の分布の差異を考慮して閾値を設定することを仮定している。これらの閾値に基づいた異常検知の仕組みを実装することで、加工条件や工具交換間隔に関する安全率を見直すことが可能となり、合理的な条件で製造することができる。さらに、工具形状が類型的に変更された場合にも、初期条件を考慮したその場補正で信頼性の高い異常判定が行える可能性がある。以降では、切削プロセスの状態遷移を包括的に監視するため、主軸モータ電流と AE の特徴量（それぞれ SF_x と SF_y に対応）を組み合わせた、マルチセンサ融合型の加工監視システムを検証する。粗加工における工具摩耗や破損と 2 つの特徴量の関係を明らかにするだけでなく、仕上げ加工における AE 増幅のメカニズムを考察することで、仕上げ面性状を含めた総合的な加工監視が行える可能性を示す。

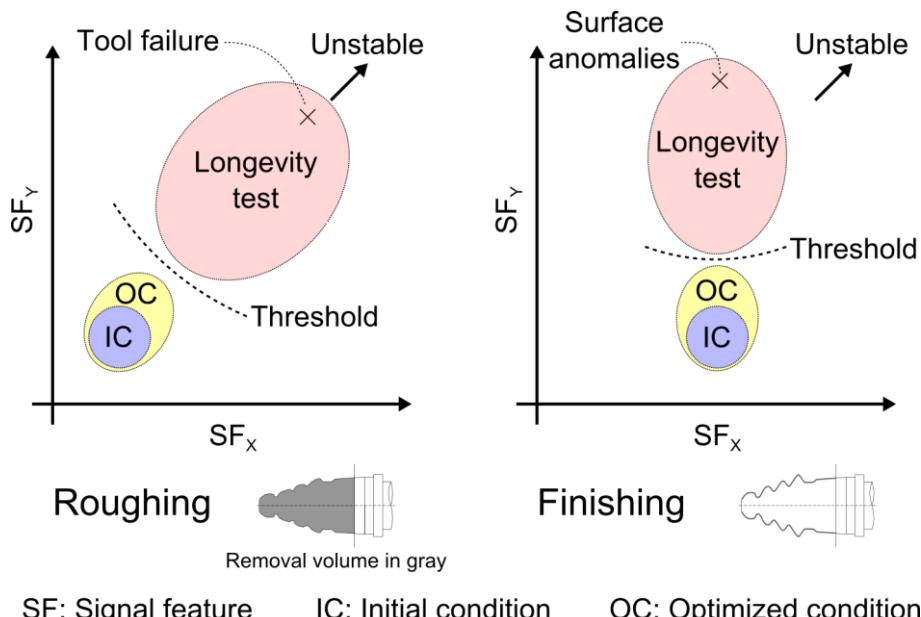


Fig. 4-3 Schematic illustration of state transition and adaptive thresholding for multi-step process.

4.3 工具と工作物

4.3.1 工具材質と加工プロセス

近年の先端エネルギー機器などの高付加価値製品の製造分野においては、Ni 基合金や Ti 基合金のような難削材が対象となることが多い。これらの材料では加工硬化した表面の影響を受け、急峻な温度上昇がおこることで、過剰な摩耗状態に至ることが想定される [9][10]。このような状況を改善するため、さまざまなコーティングが施された超硬合金工具、およびセラミック工具や多結晶 cBN (Cubic boron nitride) 工具が、工作物の形状や要求精度に応じて用いられるが、摩耗抑制 [11]、工具寿命 [12]、表面の生成メカニズム [13] に関しては、多くの課題が残されており、今後も継続的な研究が求められる。一方でハイス材の工具は、超硬工具やセラミック工具と比べて絶対的な摩耗耐性は低いが、低速の切削速度域においては優れた韌性をもつたため、厳しい幾何公差を有する複雑形状に対しては、依然としてよく用いられている [10]。産業用途としては、航空機部品のダブテール型溝のプローチ加工 [14]、および蒸気タービンロータのクリスマスツリー型溝のミーリング加工が挙げられる。また、コーティング材種や刃数などの工具の設計パラメータも、工具寿命や除去能率の要点となる。例えば、ハイス材の歯切り工具 [15] およびミーリング工具 [16][17][18] に対し、PVD (Physical vapor deposition) コーティングに対する詳細な摩耗挙動などが調べられている。加工監視のセンシング結果においても、工具の状態変化に着目しながら定量化することが重要である。また、大型精密部品の応用における工作物の素形材は一般に高価であり、補修が不可能な場合も多い。したがって、加工監視システムの需要は高く、欠陥のない製造のための包括的な検証が求められる。そこで、表面性状と寸法精度に高い品質が求められる、蒸気タービンロータの羽根植え込み部の溝入れ工程を取り上げ、ハイス工具による総型ミーリング加工を題材として、システムの有効性を検証していく。

4.3.2 蒸気タービンロータの溝入れ工程

マルチセンサ融合による加工監視システムを検証するため、実際の工作機械における製造プロセスについて述べる。溝入れ工程を含むロータの生産の流れを Fig. 4-4(a) に示す。全長約 10 m のロータは、タービン動翼の組み立て性に関する要求から、溝入れ加工には μm オーダの表面粗さと 0.1 mm 以下の寸法精度が求められている。また、総型ミーリングを行う CNC 横中ぐり盤を Fig. 4-4 (b) に示す。ミーリング工程は、加工表面性状と形状精度を保つために、除去体積を分割して Fig. 4-4(c) のように複数段階から構成している。円周方向に一定の角度間隔で溝を形成するため、ロータを回転方向に位置決めして繰り返し溝加工を行う。工具は Z 軸の位置を保ちながら、XY 平面内で円弧軌跡を描く。一般的なミーリング加工機では、工具状態の変化に基づいて工具交換を行うような仕組みは備わらず、実際の機械加工ショップでは高い安全係数を考慮し、使用時間を基準とし

た管理 (Time based maintenance ; TBM) で運用される場合が多い。さらに、異常発生時の材料損失に関する高い危険性を含むことから、工具状態を正確に推定する手法なしでは、工具交換頻度を下げる判断が難しい点は 4.2.2 で述べたとおりである。工具状態の推定に関しては、統計的データドリブンをはじめとした工具残存寿命の予測方法など研究されている[19]が、本章では、複合ミーリング工程の異常検知特性を把握し、統計検定に基づく加工監視システムの検証までを対象とした。切削距離に対する工具状態の詳細な遷移を理解するため、複数センサ（電力および主軸モータ電流、AE）による工具寿命試験を次節に述べる。その結果を基にそれぞれの工程における遷移状態を確認して閾値を決定し、実際の製品加工で妥当性を検証した。最後に異なる設計形状に対する閾値の拡張性に関して、長期間の製造データに基づいて議論する。

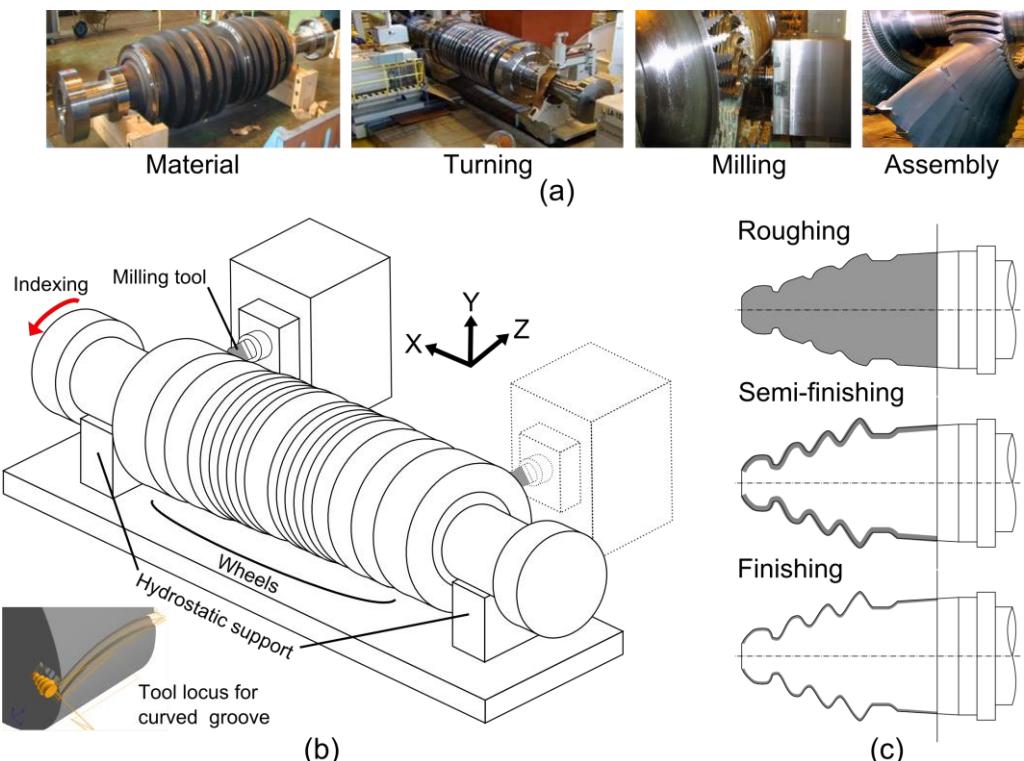


Fig. 4-4 Overview of the production process of a steam turbine rotor: (a) manufacturing flow, (b) the horizontal milling machine set up for form milling and (c) fir tree milling tools that create implanting grooves by a multi-step process, where typical removal volume is shown in grey.

4.4 マルチセンサ融合による基礎実験

4.4.1 工具寿命の実験

工具状態の劣化とセンシングした特徴量の関係を調査するため、通常の工具交換距離を超える条件での寿命試験を行う。実験段取りを Fig. 4-5 に示す。一般的な低圧タービンロータと同等の 3.5%Ni 鋼の鍛造ブロックを試験片とし、機械上に固定した。クリスマス

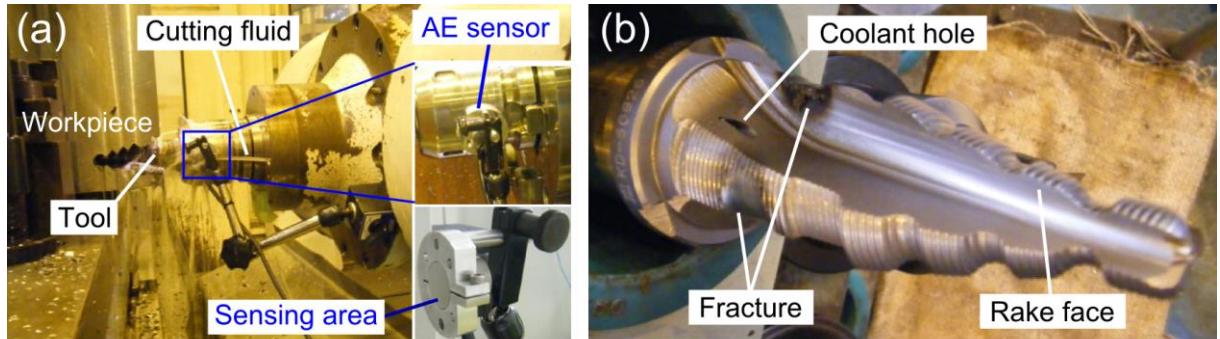


Fig. 4-5 Experimental setup of the longevity tests: (a) form milling of a straight groove. An AE sensor is located beside the tool holder and (b) fracture of the roughing tool after the test.

ツリー型のミーリング工具の素材として、粉末ハイス (Erasteel ASP2030, 熱処理後のロックウェル硬さ 66-67 HRc) を粗・中仕上げ・仕上げに用いた。コーティッドハイス工具に関しては、母材と比べて高い硬度と良好な熱的・化学的安定性を有する PVD コーティングが、アブレシブ摩耗や弱い凝着摩耗から保護する役割をもち、徐々にコーティング層が除去される予測のしやすい摩耗形態となる[15]。ここでは、低速域の切削速度でハイス工具の摩耗進行を抑制する、PVD-TiCN のコーティングを粗用工具に用いた。中仕上げ用と仕上げ用工具を 4 枚刃としたのに対し、粗用工具では切屑排出のための十分な空間を確保するため、3 枚刃とした。試験は出力 22 kW のスピンドルを備える CNC 横中ぐり盤で実施した。工作物にセンサを固定して切削領域の近傍で AE を検出する一般的な段取りとは異なり、工具ホルダの側面部に間隙を設けてセンサを設置し、非接触で検出する方式を採用した。この方式では、AE センサの検出面とホルダの間の間隙 (約 2 mm) を切削油で満たして伝搬媒体としてすることで、加工中に切削点とセンサの位置関係を維持したまま測定でき、加工監視の応用に適した信号品質が期待できる。加えて、実際の工作物では回転方向の位置決めが行われるため、この段取りを有効に活用することができる。

切削プロセスにおける変形・破壊現象を検知するため、0.35 MHz 以上の周波数帯に高い感度をもつ圧電式 AE センサ (村上技研 AE-1) を使用した。原信号にはハイパスフィルタや増幅などのアナログフィルタ処理が加えられており、廉価な低周波数帯のシステムで特徴量の測定が可能である。また、電力計 (日置電機 3390) とクランプ式電流センサ (日置電機 CT6863) を制御ユニット内に備えた。電圧信号はデータ取得システム (Rion SA-01) に入力され、PC 内にデータを保存する。AE と主軸モータ電流の信号は毎秒 2560 サンプル、電力は毎秒 2 サンプルで取得した。試験の切削条件を Table 4-1 に示す。初期条件が安定した状態であったため、工具状態の劣化を促進させるように加速係数を適用した。実際には 1 刃あたりの送り量が一定となるように、主軸回転数と送り速度に加速係数を乗算した。その結果、粗用工具で連続して加工した 7 本目の溝の途中で異常音によって強制的にプロセスを停止した時点で、刃先の折損と過大な摩耗量 (切削速度の最大点の逃げ面において、摩耗幅が約 0.7 mm) が認められた。使用後の工具の状態を Fig. 4-5(b) に示す。

Table 4-1 Cutting conditions in longevity tests for type-A grooves (depth: 91 mm).

	Roughing	Semi-finishing	Finishing
Groove length (mm)	330 (straight)		
Tested length (mm)	2310	1980	1980
Feed rate (mm/min)	12	19	15
Spindle rotation (rpm)	220	190	190
Acceleration factor	1-1.5	1-1.75	1-1.75

寿命試験の結果を概観するため、1溝あたりの主軸モータの消費電力を Fig. 4-6(a)に示す。消費電力は切削に寄与したエネルギー分のみを抽出した。粗・中仕上げ・仕上げのいずれの場合にもみられる単調増加傾向は、一般に工具摩耗の進行と相関が強いとされている。また、除去体積の関係から、粗工程の消費電力量は他の2工程と比べて数倍の差がある。次に、粗用工具の各溝における消費電力量の時系列変化を Fig. 4-6(b)に示す。粗用工具に対して、溝1本を加工するごとに定性的な工具表面状態の観察を行った結果、4本目の溝加工後にコーティングの剥離が認められ、5本目の溝加工後には工具の根本付近に初期の焼き付きが発生していた。消費電力をみても、5本目の溝から変動量が増加する傾向にあり、コーティングの剥離などに代表される工具状態の遷移によって、母材の逃げ面摩耗量が速度を上げて進行したと推定される。以上のような状態変化と特徴量の変動の関係を用いれば、粗用工具の異常状態を警告する閾値を設定することができる。しかしながら、消費電力は主軸モータの出力仕様に依存するため、他の工作機械を用いる場合には、個別のデータベースが必要となってしまう。このような加工監視の枠組みは量産製品では機能するものの、多品種少量生産への適用は難しい。そこで以降では、複数工程の総型ミーリング加工における工具状態と表面性状の包括的な理解を得るため、主軸モータ電流の時系列解析とAE信号を併用した加工監視システムを検証する。

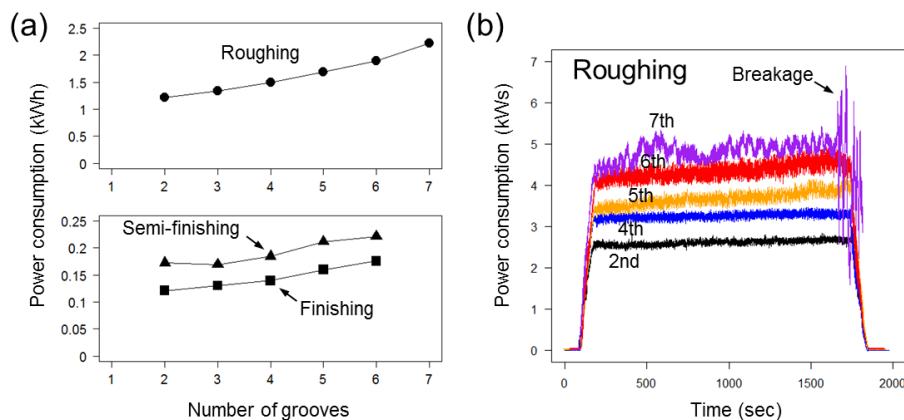


Fig. 4-6 Transition of power consumption regarding cutting processes: (a) results of a single tool with respect to groove number and (b) time series for roughing (acceleration factor is compensated).

クランプ式電流センサにより電流は電圧信号に変換される。ここで、ミーリング加工における工具状態の推定を行うため、比較的軽微な計算負荷で時系列のロバスト性を評価する指標を考える。平均、2乗平均平方根（Root mean square；RMS）などのよく知られた時系列パラメータに対して、Box[20]は品質工学の領域でS/N比（Signal to noise ratio）とよばれる実用的な指標を提案し、その特性をまとめた。ゼロ望目特性のS/N比（ゼロを目標値として正負の値をとる特性であり、S/N比は標準偏差に基づいて算出する）は、主軸モータ電流のようにゼロ点付近で振動する信号のロバスト性を評価するのに適しており、以下のように記述される[20]。

$$\eta = -10 \log_{10} \left\{ \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right] \right\} \quad (4-1)$$

ここで n は計算に用いるサンプル数、 y_i は信号のサンプル値である。また、周期誤差を除去しながら高い安定性と応答性を両立させるため、主軸回転の周波数 f_s に対し、整数倍の回転回数 N に基づき n を以下のように決定した。

$$n = \frac{n_d N}{2f_s} \quad (4-2)$$

ここで、 n_d はデータ取得時の1秒あたりのサンプル数、係数の2は主軸モータと工具回転のギア比を表している。また、デジタル信号の前処理に関しては、ローパスフィルタ（5次のバッタワースフィルタ）を施した。数10Hzとなる刃先の通過周波数に対して、カットオフ周波数は500Hzと十分大きい値とし、不要な雑音を取り除いている。

次に、AEではセンサアンプの出力である電圧信号より特徴量を抽出した。電圧信号に関しては、AE原信号に対するアナログ周波数フィルタ、および増幅処理が施されており、アブレシブ摩耗や凝着摩耗、および工具内部のクラック伝搬などの突発的な現象を含む周波数帯を、雑音を除いて検出できる設定のため、特徴量としては振幅の代表値となる AE_{RMS} （単位時間あたりの電圧信号のRMS値）を採用した。電流とAEに対する1秒間隔の処理結果をFig. 4-7に示す。主軸モータ電流のS/N比 η は消費電力量と同様の傾向を示しており、不安定側に向けた単調減少が認められる。一方、 AE_{RMS} では仕上げ用工具を長距離で使用した場合の明瞭な応答が特徴である。各工程に対するAE信号の対応を考えると、粗加工ではアブレシブ摩耗や切削現象に起因するAEと、大きい振幅を発生する強い凝着摩耗や亀裂伝搬の影響の両者を含んでいると考えられる。特に粗用工具の折損直前に現れている急激な振幅増加は後者の影響が大きいと考えられる。これらの現象に対して、仕上げ加工におけるAEの増幅傾向とメカニズムに関しては、のちほど議論する。

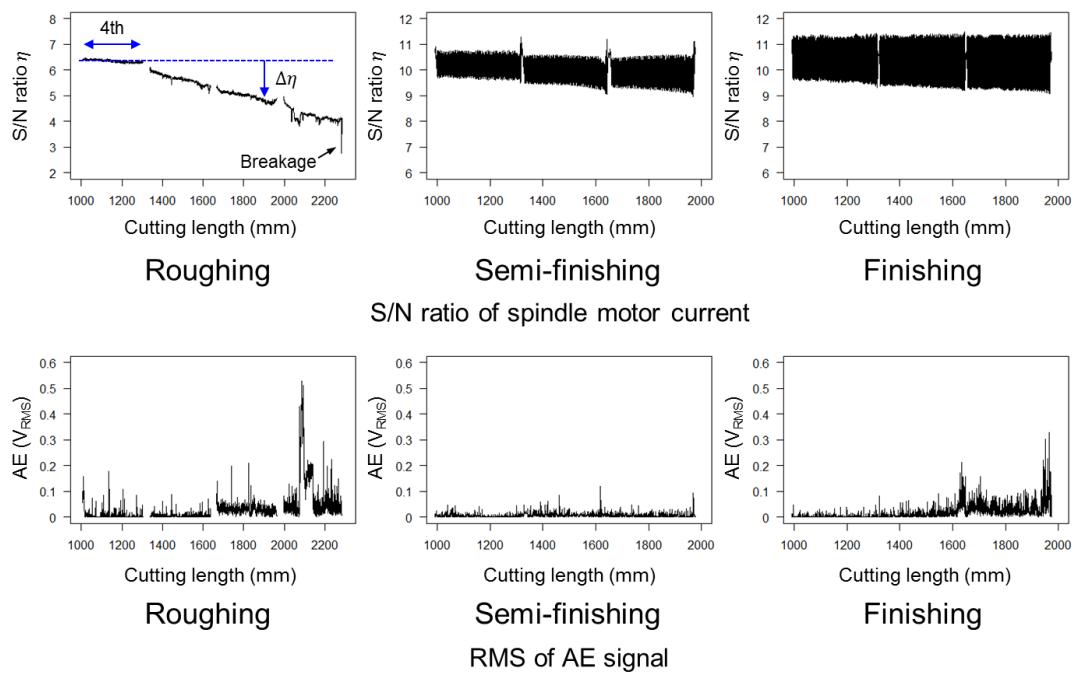


Fig. 4-7 S/N ratio of the spindle current and RMS value of the AE signal with respect to cutting length (data with full radial immersion are shown for roughing).

4.4.2 工具摩耗・加工表面性状の異常検知

それぞれのセンサの遷移挙動を明らかにするため, Marinescu と Axinte[7]が提示した切削抵抗と AE の状態遷移を表す2次元図にならった分析を試みた. 結果を Fig. 4-8 に示す. 連續加工した溝の本数に応じて凡例を変えて表示している. AE_{RMS} は値の分散が大きいため, 縦軸に対数スケールを用いる. Axinte らの実験では複数のインサートチップからなるミーリング工具の切削抵抗値が用いられていた. ここでは代わりに主軸モータ電流の S/N 比 η ($\Delta\eta$ は 4 溝目の平均値からの減少量) を適用したが, 実際に粗用ミーリング工具の状態遷移において, 明瞭な応答が認められる. つまり, 過度の摩耗進行によって, 主軸モータ電流の外乱成分が拡大するだけでなく, 工具破損に関連した振幅の大きい AE 発生をもたらしている. 中仕上げ用工具では, AE_{RMS} の増加は見られず, η のみが徐々に減少する. 粗工程と比較すると, 劣化の初期段階にあると考えられる. 一方で仕上げ用工具では, η が微小量の減少を示しながら, AE は大幅に増加する傾向を示す. 中仕上げ用と仕上げ用工具に関しては, 通常の摩耗水準で試験を完了し, 工作物表面の異常状態も顕在化しない. 仕上げ用工具における AE 増幅の要因に関しては, 文献[7][8]に示されているように, 表面に残された微細な切屑の巻き込みや引きずりと関連した, 非定常事象の兆候を示していると推定される. このように, 複数工程から構成される総型ミーリング加工において, 主軸モータ電流と AE の特徴量を組み合わせることで, 異常の兆候を警告する適切な閾値を決定できる可能性がある.

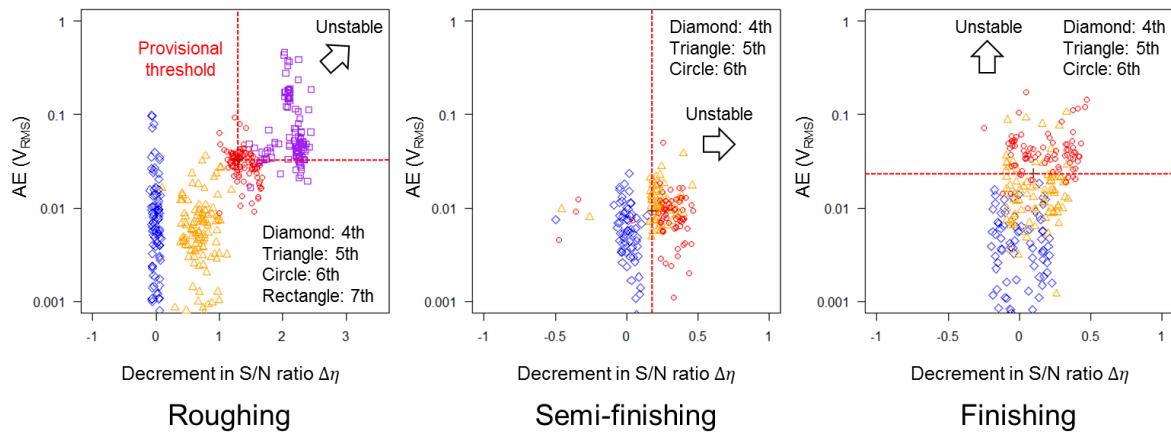


Fig. 4-8 Two-dimensional plots of S/N ratio of the spindle motor current and RMS value of the AE signal. 10-second interval data plots of the longevity tests are shown.

ここで閾値の設定を具体化していく。実際の製造工程に対する警告閾値を決めるため、クラスタリング法を試行した。粗用工具に対しては、2つのセンサ値のデータ群に対して、定常・遷移・非定常の3つの状態を仮定した。これを *k-means* 法[22]によって事前情報なしでクラスタ数3の分類を施し、遷移クラスタに分類されたデータ群の平均値を仮の閾値とした。結果を Table 4-2 に示す。また、中仕上げ用と仕上げ用工具に対しては、明らかな異常現象が認められなかつたため、それぞれのデータ群全体を遷移状態とみなす。最後に、Fig. 4-8 に示すような境界線を2次元プロットに加える。例えば、粗用工具の定常・非定常クラスタ間では平均値に有為な差があるため2次元的な境界としたが、中仕上げと仕上げではXまたはYの单一方向にのみデータ群が有為に変化しているため、境界は1次元とする。仮の閾値は次節で実際の製品加工において検証していく。

Table 4-2 Summary of provisional thresholds.

	Roughing	Semi-finishing	Finishing
$\Delta\eta$	1.290	0.176	-
AE_{RMS}	0.033	-	0.024

4.5 製造プロセスにおける異常検知特性の検証

4.5.1 実験条件

Fig. 4-4(b)に示すように、蒸気タービンロータのミーリングを対象とした実時間の加工監視システムは、CNC 横中ぐり盤に実装する。この工作機械は 30 kW の主軸を備え、ロータを支持する油静圧軸受と、回転位置決めユニットをもつ。システムの構成を Fig. 4-9 に示す。主軸モータの電力系統が設置される CNC 装置の主制御盤は、主軸や PC が配置される移動式コラムに対して約 10 m 離れており、アナログ電圧信号の雑音耐性への配慮

が必要である。そこで、電流センサからの電圧出力を、いったん主制御盤の近くに設置した AD 変換器 (National Instruments NI 9234) に入力し、イーサネットを経由して PC に接続する方式とする。時系列データは PC に保存される。各工程に着手する際には、対応する閾値テーブルを呼び出すコメント文を CNC プログラムに付与することで、CNC 装置に加工プロセスの仕様を認識させる仕組みとする。監視対象の特徴量が閾値を超えた場合、システムは異常と判断して CNC 装置に警告信号を発する。粗工程ではその場での切削送り停止、中仕上げ・仕上げ工程では、1 溝が完了した時点での停止、のようにプロセスに伴う危険度を考慮して使い分ける。また、溝形状、工作物の材質を含めた閾値の分類が正確な検出の要件と考えられる。例えば、Fig. 4-9(b)の A 型の溝は、工具寿命試験と同型の断面形状であり、実験で決めた仮の閾値を適用できる。しかし、事前の実験情報がない場合、製造中のモニタリングデータを用いて、閾値をその場で適応的に決めることが必要である。Fig. 4-9(c)に示す B 型の溝は、A 型に類似した形状で同様の複数の工程を経るが、深さ方向に約 1.6 倍と大型である。そのため、A 型と比べると、安定切削状態においても検出される AE は増加するものと予想される。工具寿命試験と実際の製造工程の相違点は、溝加工における工具中心軌跡 (直線と円弧)、主軸の出力特性、工作機械の構造 (試験加工用機械の X 軸の駆動量は 2 m、ロータ用では 10.5 m)、および工作物の外形形状 (立方体とロータのホイール) が挙げられる。加速試験と同様に、AE センサは工具ホルダの側面に間隙を設けて配置され、加工油で満たした状態で使用する。

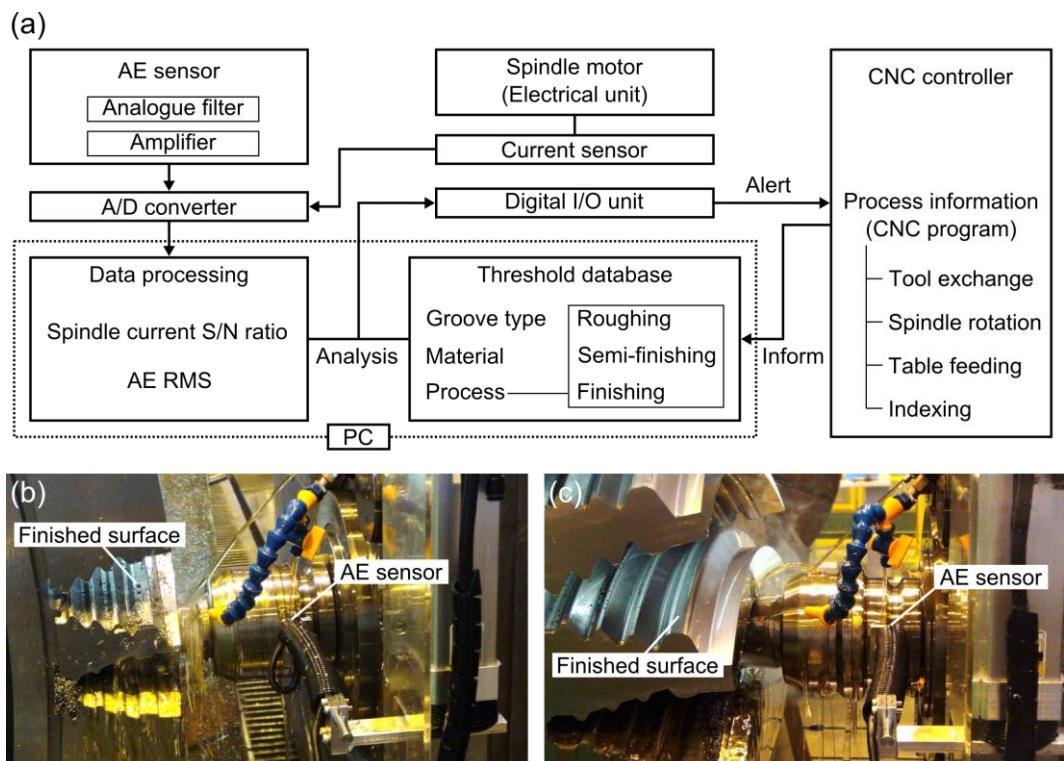


Fig. 4-9 Performance verification of the TCM system for actual products: (a) schematic of real-time data processing, (b) roughing of a type-A groove, and (c) roughing of a type-B groove.

4.5.2 検証結果

システムの検証における加工条件を Table 4-3 に示す。工具と工作物であるロータの材質は工具寿命試験に準ずるが、製造上の安全性を考慮しながらシステムを検証するため、工具交換時の(累積)溝加工長さは Table 4-1 の試験条件と比べて短距離に設定している。A 型の 44 溝分の記録に対して 10 秒間隔で 2 次元図に表記した結果を Fig. 4-10 に示す。粗工程では、すべての点が仮の閾値を下回り、製造プロセスが安定条件であることが確認できる。一方で中仕上げ・仕上げ工程ではいくつかの点が閾値を超える場合が認められる。中仕上げ工程では、特定の 3 溝のデータ点のみ、 η の減少が顕在化した。対応する 3 溝の粗・仕上げ工程でも、同様に η の減少が見られたが、仕上げ表面状態の異常は現れない。この現象は、外観検査では検知されない水準の不整合が粗用工具に含まれており、プロセスを不安定化したものと推測される。品質管理を万全にするためには、システムによる警告後、工具状態を目視確認するなどの手順が適切である。また、仕上げ工程で数点が閾値を超えるが、AE は $\Delta\eta$ と比べて大きい分散をもつ傾向があるため、累積的な超過が発生した場合のみ警告を発する方針が考えられる。AE の分散の要因に関しては後述する。以上のように、A 型の工具寿命試験を利用した閾値による異常判定の手順は、長期の製造工程を実時間で判定する場合においても、十分な実用性を確認できる。

Table 4-3 Cutting conditions in TCM verification.

	Type A (depth: 91 mm)			Type B (depth: 149 mm)		
	Roughing	Semi-finishing	Finishing	Roughing	Semi-finishing	Finishing
Groove length (mm)	320 (curved)			507 (curved)		
Replacement length (mm)	640	1280	640	1014	1014	1014

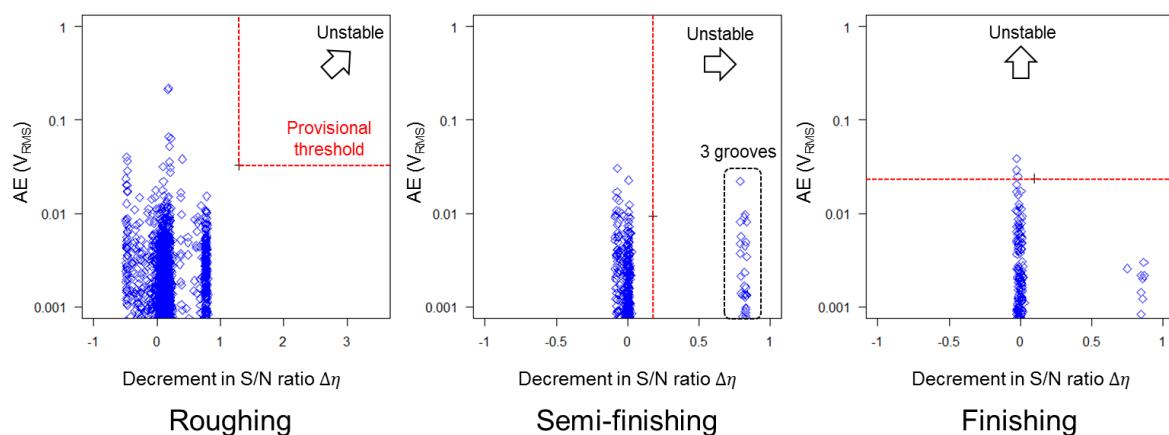


Fig. 4-10 Two-dimensional plots for type A compared with the provisional threshold in Fig. 5. 10-second-interval data plots for 44 grooves are shown.

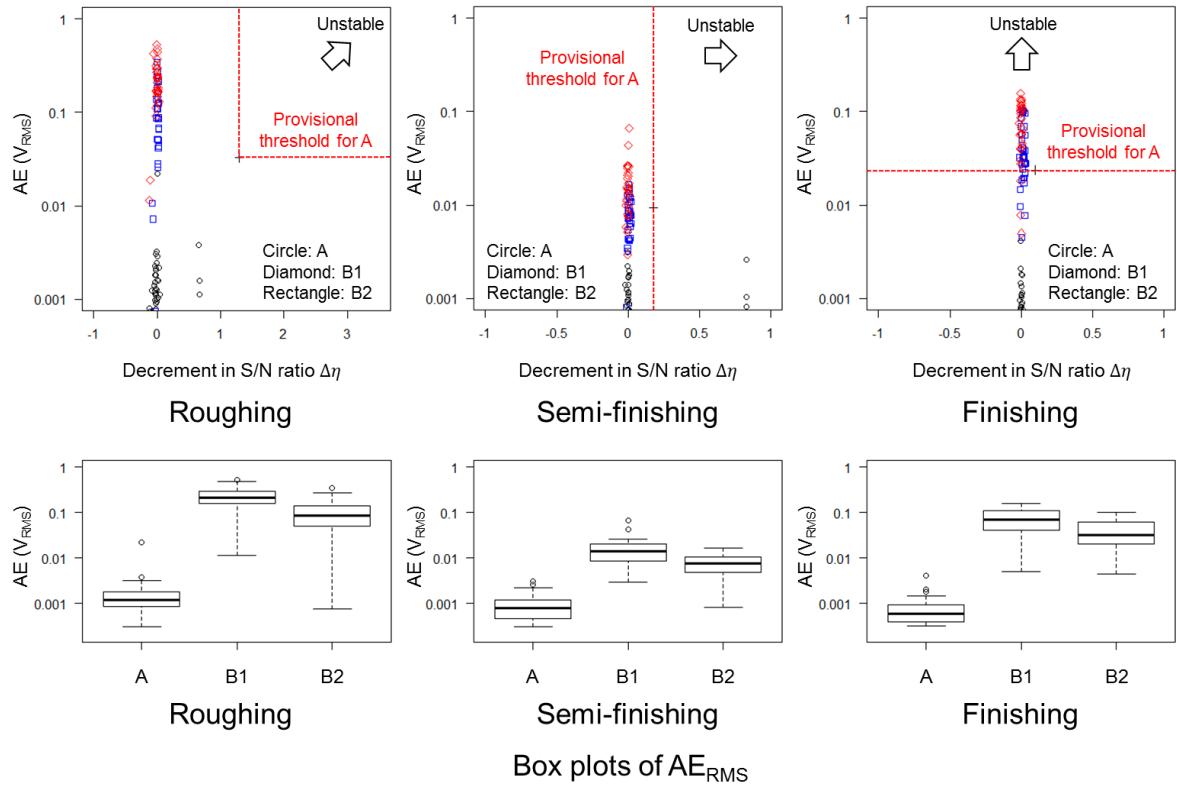


Fig. 4-11 Two-dimensional plots for types A, B1, and B2 in actual manufacturing. Each plot represents one groove. Box plots clarify the differences between AE signals.

Table 4-4 Paired t-test statistics for TCM verification tests. 32 grooves of types B1 and B2 were evaluated.

B1 and B2 (AE _{RMS})			
	Roughing	Semi-finishing	Finishing
P-value	5.83×10^{-5}	3.01×10^{-4}	5.54×10^{-3}

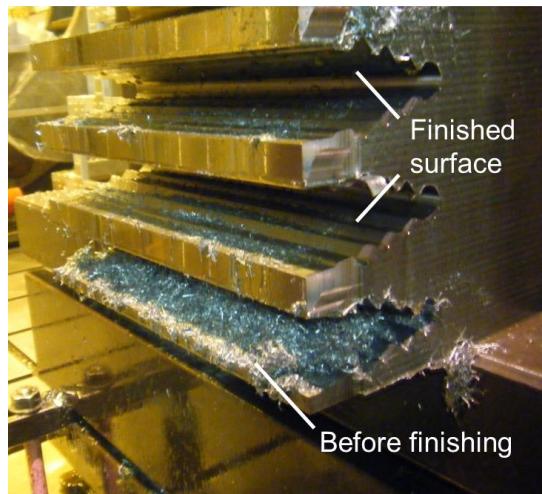
4.6 考察

A型の検証に続いて、B型の2件のロータ製造に対するデータをB1, B2として取得した。その際の加工条件はTable 4-3に併記している。B型では事前の工具寿命に関する詳細情報がない状態で製造するため、十分な安全率をもって交換加工距離を設定している。1溝あたりのB型の除去体積は、A型のおよそ4倍である。寿命試験を行わずに適切な閾値で加工監視を行うためには、製造の初期状態におけるデータを利用し、仮閾値を適正化することが求められる。これらの3種類のデータ群に対して、1溝あたりに換算した $\Delta\eta$ とAE_{RMS}をFig. 4-11に示す。 $\Delta\eta$ （ここでは初期の3溝の平均値に対する減少量）は、いずれの場合も定常であったが、AE_{RMS}はB型で明らかな増加の傾向を示した。また、B1とB2のAE_{RMS}に関する分布の差は、Table 4-4に示すように対となるt検定[23]によつ

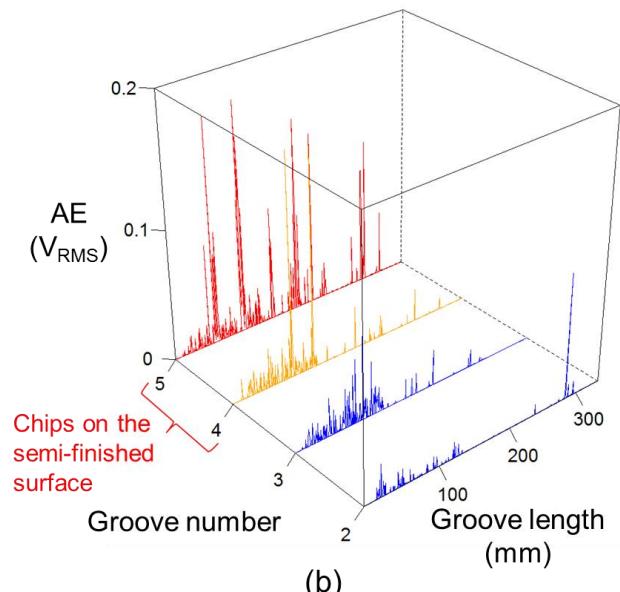
て有為であることがわかった (P 値は 2 群の平均値に差がないとする帰無仮説の事象が起きる確率). 文献[3]では, 被削性の低下が切屑形態などに影響を与え, AE のエネルギーが増加する事象も示されている. 例えば, 旋削において被削性の低い材料では鋸状の切屑となり, 快削状態の流れ型切屑に対して AE が増加する. また, 工具状態に関しても, 刃先の再研磨を完了し, 使用前に外観が検査された状態であっても, 実際の性能にはばらつきが生じる可能性を完全に排除することが難しい. このように, ロータまたは工具材料のばらつきによって, ロータによって検出された AE に差が生じたと考えられる.

次に, 消費電力量の結果に見られるように, 仕上げ工程は中仕上げ工程と比べてエネルギー消費量は少ない. しかしながら, AE では仕上げ工程がより大きい振幅が検出されている現象を考える. この原因として, AE 信号が切屑生成, 工具摩耗, 亀裂伝播, 表面性状に対する異常 (材料の引きずりや巻き込み) などの複合的な要因を含むことが挙げられる. 一般には逃げ面摩耗幅が増加した結果, 刃先と切削面の間の摩擦の影響が顕在化する[3]とされる. しかし, 仕上げ用工具は, 交換加工距離に達した際にも通常摩耗の水準内であった. したがって, 切屑の生成形態にも特段の変化を及ぼしていないと推測される. そこで, 残される主要因である表面異常に關して, 材料の引きずりや巻き込みによる AE 発生を検証する実験を行った. 実験の様子を Fig. 4-12(a) に示す. 同一の仕上げ用工具 (A 型) により 5 溝を連續して加工し, 4 溝目と 5 溝目においては, 中仕上げ加工の表面に切屑の束を意図的に付与した状態とした. AE_{RMS} の遷移を Fig. 4-12(b) に示す. Fig. 4-7 に示す工具寿命試験と比べると, 切屑の付与による影響は突発的な AE の増幅として現れた. 実験の範囲では, 仕上げ面の不整合などはみられなかった. しかしながら, 他の要因と比べ表面異常に關連する AE である可能性が高く, Axinte ら[8]が示したような, 材料の引きずりや巻き込みが顕在化する兆候であると考えられる. このように, 工具摩耗に關連して徐々に AE が増加した粗用工具の挙動とは異なり, 仕上げ用工具では, 加工表面性状の異常に至らない水準で明瞭な AE の振幅増加が認められたことから, 仕上げ工程において, ある閾値を超えないように AE を監視することは, 表面品質の確保に有効であると考えられる.

提案した加工監視システムは, AE の特性を活用することで, 工具状態と表面性状に関する包括的な情報を獲得できる見通しを得た. 粗工程における AE の増加は工具摩耗と亀裂伝播に起因しているのに対し, 仕上げ工程では表面性状に関する異常現象を捉えられる可能性があった. AE の欠点のひとつに, 実際の計測における検出強度のばらつきが挙げられるため, 主軸モータ電流の時系列解析によって安定的に工具摩耗を追跡できる機能をシステムに組み込んだ. 本論文の範囲では, マルチセンサに対する異常閾値を 1 次元または 2 次元の直線状の境界で表したが, より発展的な分類手法, 例えば, サポートベクターマシン[2]などの応用は, システムの応用展開を促進するものと考えられる. 以上のように, 大型精密部品を対象としたマルチセンサ融合型の加工監視システムについて, 蒸気タービンロータの溝入れ工程で有効性を実証することができた.



(a)



(b)

Fig. 4-12 AE generation for the finishing tool when a bundle of chips is intentionally left on the semi-finished surface: (a) experimental setup and (b) the time series for each groove.

4.7 結言

大型精密部品を対象としたマルチセンサ融合型の加工監視システムを提案し、蒸気タービンロータの溝入れ工程において有効性を検証した。主軸モータ電流と AE の特徴量を用いて、プロセスの異常に関する包括的な情報を獲得できる見通しである。粗工程で工具の劣化傾向を正確に追跡できるほか、AE は仕上げ工程の表面異常に対して高い検出感度が得られる可能性があった。結果を以下にまとめる。

- 1) 主軸モータ電流と AE の特徴量を 2 次元図で可視化することで、粗・中仕上げ・仕上げのような複数の工程における状態遷移を明らかにし、マルチセンサ融合により異常判定を行う枠組みが有効に機能することを確認した。
- 2) 工具状態の定性的評価と信号の特徴量を比較し、粗工程における AE の発生は、工具逃げ面のアブレシブ摩耗、強い凝着摩耗（スコーリング）、および亀裂伝搬などの影響が含まれることを明らかにした。
- 3) 仕上げ工程における AE の要因を調べるため、表面に切屑の束を意図的に加えた切削実験を行い、表面異常の検出に関わる微細な破壊現象を捉えられる可能性を示した。

参考文献

- [1] Lee DE, Hwang I, Valente CMO, Oliveira JFG, Dornfeld D a. Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission. *Int J Mach Tools Manuf* 2006;46:176–88.
- [2] Teti R, Jemielniak K, O'Donnell G, Dornfeld D. Advanced monitoring of machining operations. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2010;59:717–39.
- [3] Hase A, Wada M, Koga T, Mishina H. The relationship between acoustic emission signals and cutting phenomena in turning process. *Int J Adv Manuf Technol* 2013;70:947–55.
- [4] Hung C-W, Lu M-C. Model development for tool wear effect on AE signal generation in micromilling. *Int J Adv Manuf Technol* 2012;66:1845–58.
- [5] Jemielniak K, Arrazola PJ. Application of AE and cutting force signals in tool condition monitoring in micro-milling. *CIRP J Manuf Sci Technol* 2008;1:97–102.
- [6] Yen C-L, Lu M-C, Chen J-L. Applying the self-organization feature map (SOM) algorithm to AE-based tool wear monitoring in micro-cutting. *Mech Syst Signal Process* 2013;34:353–66.
- [7] Marinescu I, Axinte D a. A critical analysis of effectiveness of acoustic emission signals to detect tool and workpiece malfunctions in milling operations. *Int J Mach Tools Manuf* 2008;48:1148–60.
- [8] Marinescu I, Axinte D. A time-frequency acoustic emission-based monitoring technique to identify workpiece surface malfunctions in milling with multiple teeth cutting simultaneously. *Int J Mach Tools Manuf* 2009;49:53–65.
- [9] Zhu D, Zhang X, Ding H. Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys. *Int J Mach Tools Manuf* 2013;64:60–77.
- [10] M'Saoubi R, Axinte D, Soo SL, Nobel C, Attia H, Kappmeyer G, et al. High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2015;64:557–80.
- [11] Obikawa T, Yamaguchi M. Suppression of notch wear of a whisker reinforced ceramic tool in air-jet-assisted high-speed machining of Inconel 718. *Precis Eng* 2015;39:143–51.
- [12] Twardowski P, Legutko S, Krolczyk GM, Hloch S. Investigation of wear and tool life of coated carbide and cubic boron nitride cutting tools in high speed milling. *Adv Mech Eng* 2015;7.
- [13] Wojciechowski S, Twardowski P, Pelic M, Maruda RW, Barrans S, Krolczyk GM. Precision surface characterization for finish cylindrical milling with dynamic tool displacements model. *Precis Eng* 2016;46:158–65.

- [14] Axinte D, Boud F, Penny J, Gindy N, Williams DJ. Broaching of Ti-6-4 – Detection of Workpiece Surface Anomalies on Dovetail Slots through Process Monitoring. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2005;54:87–90.
- [15] Gerth J, Larsson M, Wiklund U, Riddar F, Hogmark S. On the wear of PVD-coated HSS hobs in dry gear cutting. *Wear* 2009;266:444–52.
- [16] Bouzakis K-D, Efstathiou K, Vidakis N, Kallinkidis D, Angos S, Leyendecker T, et al. Experimental and FEM Analysis of the Fatigue Behaviour of PVD Coatings on HSS Substrate in Milling. *CIRP Ann - Manuf Technol* 1998;47:69–72.
- [17] Santos SC, Sales WF, da Silva FJ, Franco SD, da Silva MB. Tribological characterisation of PVD coatings for cutting tools. *Surf Coatings Technol* 2004;184:141–8.
- [18] Wu W, Chen W, Yang S, Lin Y, Zhang S, Cho TY, et al. Design of AlCrSiN multilayers and nanocomposite coating for HSS cutting tools. *Appl Surf Sci* 2015;351:803–10.
- [19] Gao R, Wang L, Teti R, Dornfeld D, Kumara S, Mori M, et al. Cloud-enabled prognosis for manufacturing. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2015;64:749–72.
- [20] Box G. Signal-to-Noise Ratios, Performance Criteria, and Transformations. *Technometrics* 1988;30:1–17.
- [21] Hase A, Mishina H, Wada M. Correlation between features of acoustic emission signals and mechanical wear mechanisms. *Wear* 2012;292-293:144–50.
- [22] Yang L, Kang HS, Zhou YC, Zhu W, Cai CY, Lu C. Frequency as a key parameter in discriminating the failure types of thermal barrier coatings: Cluster analysis of acoustic emission signals. *Surf Coatings Technol* 2015;264:97–104.
- [23] Crawley MJ. *The R Book*. Chichester: John Wiley & Sons; 2012.

第5章 大型工作機械の空間補正によるオンマシン寸法計測

5.1 緒言

工作機械を利用したオンマシン計測では、寸法のトレーサビリティを保つ仕組みに課題がある。すなわち、工作物を加工する空間内で、制御装置による指令座標と、実際に位置決めされる点の間に誤差が生じる。この位置決め誤差は空間誤差と定義され[1]、例えば3次元直交座標系の格子点におけるベクトル量として評価される。近年、空間誤差の計測法および補正法に注力がなされ、応用展開をみせているが[2]、これらの手法だけでは大型精密部品に対するトレーサビリティ体系は万全とはいがたい。なぜなら、空間誤差の計測は、工作物が工作機械上に搭載されない状態で行われ、実際に製品を加工する時点では、設置環境の温度変動などの影響により、さらなる誤差を含む可能性があるためである。特に大型部品用の工作機械ではこれらの影響が現れやすく、絶対寸法を保証することが難しかった。変動の要因を切り分けるため、機械要素の熱的過渡応答をモデリングして変形を予測する試み[3][4]もあるが、研究途上である。そこで本研究では、環境変動に対するロバスト性を備え、大型精密部品の計測において特に重要となる、空間誤差の主な要素をオンマシンで計測・補正するシステムを提案し、蒸気タービンロータを例に挙げて検証する。

5.2 大型精密部品の寸法計測の要件

5.2.1 計測精度と汎用性

ここでは、大型部品の3次元座標計測の精度と汎用性の制約について考える。広義の座標計測法を考えると、トータルステーションやデジタル写真測量などの光学的測量技術[5]が挙げられる。これらは可搬型の計測機器として市販され、大型部品の形状計測や組み立て調整に用いられている。また近年では、別種のセンサ間のデータ統合や3次元点群の効率的なデータ処理法の開発も進んでいる[6]。Fig. 5-1に示すように、大型精密部品の計測範囲として10 m程度を想定すると、これらの実用上の精度限界はおよそ0.01 mmである。レーザ干渉計により測距方向に数 μm の精度をもつ、Fig. 5-2に示すレーザトラッカにおいては、計測対象の反射鏡（Retroreflector）を3次元的に追尾する際に、方位角・仰角方向に計測ヘッドの回転運動を伴い、球面極座標系から直交座標系に変換している。このとき、ヘッド内部の光学系のアライメント誤差およびロータリエンコーダの精度、基準絶対距離（Birdbath distance）の誤差の影響があり、レーザトラッカ計測の不確かさを増加させている[8]。本研究では、レーザトラッカの不確かさを考慮してシステムに統合することで、大型精密部品におけるオンマシン寸法計測の実現を目指す。

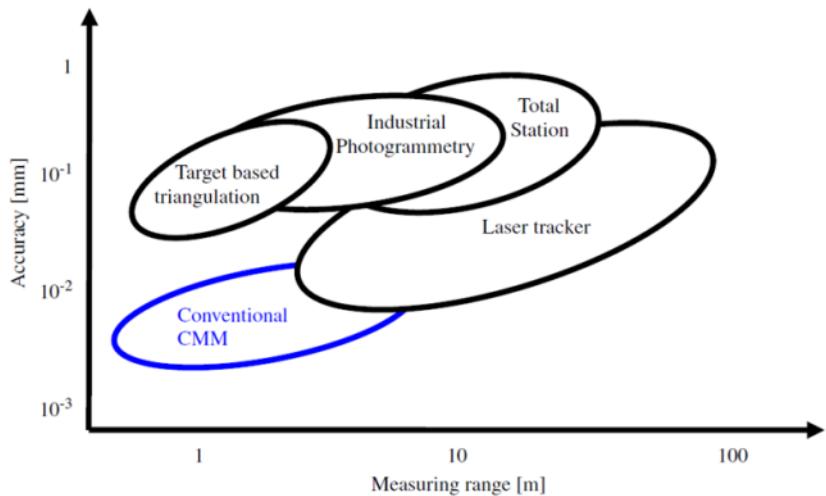


Fig. 5-1 Accuracy of conventional three-dimensional coordinate measuring methods [7].

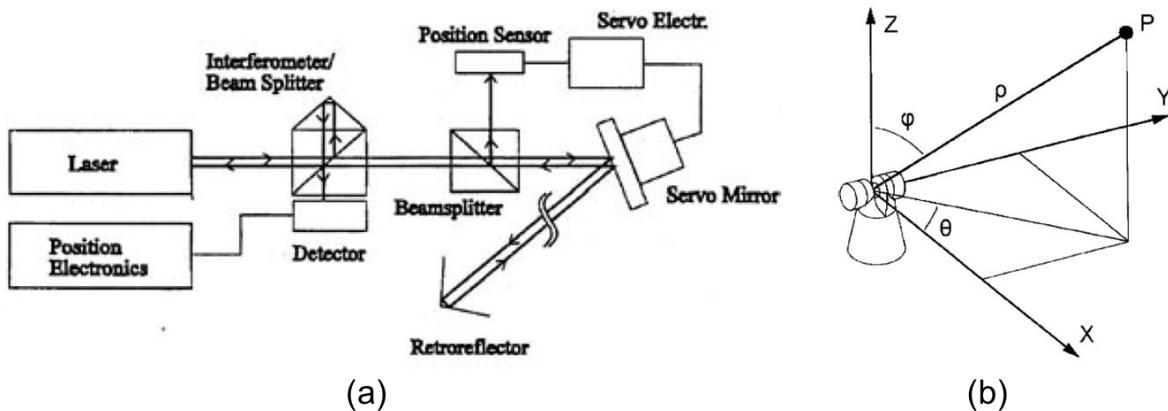


Fig. 5-2 Laser tracker: (a) basic principle [5] and (b) coordinate system [7].

可搬型機器が主となる光学式座標計測法に対し、工業用部品の寸法計測においては、据置き型の接触式 3 次元座標測定機 (CMM) が幅広い用途に適用されている。一般的な CMM は 3 次元直交座標系からなり、工作機械に先立って空間誤差の計測・補正法が確立された経緯がある[9]。つまり、温度管理された計測室内で寸法のトレーサビリティを確保できる。CMM はさまざまな計測対象に用いられるが、大型部品に対しては特殊な設備が必要になる場合もあれば、形状や重量によっては計測自体が実施できない状況も考えられる。そのため、工作機械の諸特性を理解し、可能な限り CMM に近い精度を有するオンマシン計測の重要度が高いといえる。このような観点で取り組みを行っている事例として、歯車計測の分野が挙げられ、製造公差と計測精度について議論が重ねられている。例えば、自動車用途で一般的な直径 30-200 mm の歯車はトレーサブルな領域であるが、船舶や発電設備向けの直径 700 mm を超える歯車では校正体系が存在しない。さらに、近年の風力発電設備の部品 (ハウジングおよび歯車、ベアリング、シャフト) の寸法公差は、10~50 μm に達することもある[10]。このような問題に対し、Wendt ら[11]は、

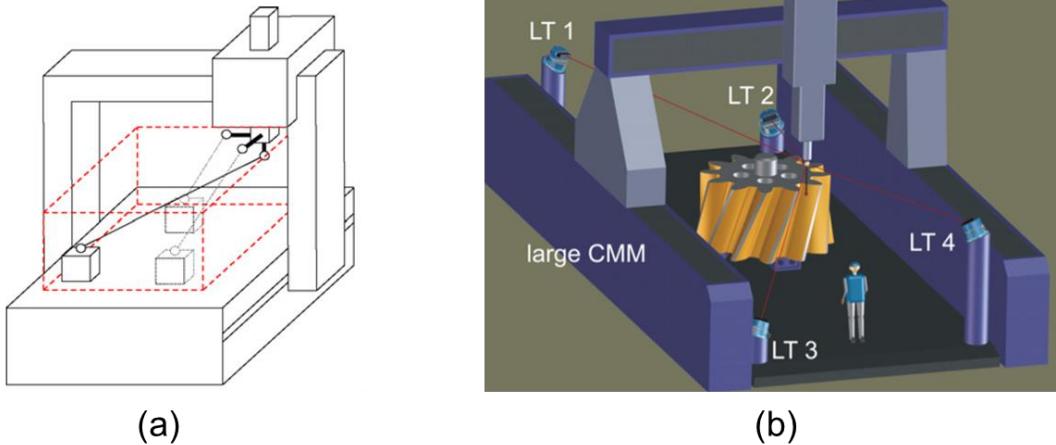


Fig. 5-3 Multilateration: (a) basic principle on 3-axis machine [9] and (b) M3D3 system [11].

Fig. 5-3 に示すマルチラテレーションに基づいて、同時に 4 個のレーザトレーサを同時に用いる M3D3 とよばれるシステムを提案した。マルチラテレーションとは、車両や航空機などのナビゲーションで広く用いられる 3 点測位原理である。レーザトラッカの場合は、計測ヘッドの位置を変更した複数回の計測を行い、空間誤差の分布を算出する。また、レーザトレーサは、CMM および工作機械の空間誤差計測を目的として開発されたレーザトラッカであり[9]、一般的なレーザトラッカとは異なり、計測ヘッド中央に配置された真球を基準とした距離計測を利用することで、不確かさを大幅に改善している。このシステムはリアルタイムでの 3 次元空間誤差計測を実現するものである。計測室内の CMM を用いた実験で良好な結果を得ており、次の段階では製造現場での検証を目指している。このような一部の先行研究を除いて、大規模な工場環境における大型精密部品のオンマシン計測の例は、ほとんど報告されていない。

M3D3 のようなその場でのマルチラテレーションは、 μm オーダのきわめて高い空間精度を実現できる反面、測長光路の遮蔽を考慮した複数の計測機器の配置に課題がある。一方で、 μm オーダの精度が必要でない場合は、レーザトラッカ単体でも工作機械の空間計測を行える。Wang と Maropolous[12]は、レーザトラッカによる小型工作機械 (300 mm \times 200 mm \times 80 mm) のリアルタイム計測を検討した。また、Ibaraki と Yuasa[13]は、粗動直線軸の位置決め精度改善を報告している。これらの事例では、レーザトラッカの不確かさの範囲において、幾何学的および運動学的、熱的要因を含むあらゆる工作機械の運動誤差を補償する可能性を示している。これに対して、本研究ではオフライン（大型工作機械に工作物が搭載されておらず、駆動範囲の全体で空間誤差の計測を行える状態）で取得した空間誤差に加え、計測対象の形状や精度の特徴に応じて、リアルタイム補正の優先度を高める複合的な計測戦略を用いることを要点とする。オンマシン計測における汎用性と、その場でのマルチラテレーションに次ぐ高い計測精度を両立する仕組みに関して、次節以降で詳細を議論していく。

5.2.2 オンマシン寸法計測の対象選定

システムの計測精度と汎用性を具体的に検証するため、本研究では軸部品の長さと直径の計測に焦点を当てる。このような課題に対する研究例は多く、1989年に Shiraishi ら [14]はオンマシン寸法計測の代表的な応用例として、旋盤で加工する円筒の長さや幾何形状の計測法を総括している。一方で、軸径が 1 m を超える大型の工作物を対象としたオンマシン計測を扱った例は、これまでに報告されていない。このような対象において高精度な寸法計測を実現するためには、前述した環境変動や工作機械の空間誤差の影響を精査し、計測不確かさを見積る必要がある。本研究では、主要な部位の寸法に 10^{-5} オーダの高い相対精度が求められる、蒸気タービンロータを計測対象に選定する。

蒸気タービンシステムは複数のロータで構成されることが一般的である。ロータの素形材は、軸部と羽根（タービン翼）を植え込むホイール部の基本要素からなる。システムのなかで最も寸法が大きいロータは低圧（タービン）ロータとよばれ、全長が 10 m に達することもある。低圧ロータでは、軸方向のホイール位置に関する寸法公差の許容値が厳しいことから、長さ計測の検証試験の対象とした。これに対して、高温側で使用される高圧（タービン）ロータは、小径のホイールが軸方向に密に配置され、その直径寸法の計測が課題である。また、後述するように工作機械上で真直度に関する空間誤差の影響を直接的に受けやすい特性があるため、これらの補正を考慮した直径計測の検証例として選定した。

5.3 大型精密部品のオンマシン計測システム

5.3.1 工作物の特徴と寸法公差

蒸気タービンロータは、精密切削および組み立て工程において、総合的に品質を保証する必要があり、およそ 6 ヶ月の長いリードタイムで製造される。トレーサブルな自動計測システムが実現されれば、工程の合理化によるリードタイムの短縮が期待できる。一般的な蒸気タービンシステムの低圧ロータを Fig. 5-4 に示す。Fig. 5-4(a)の鍛造 3.5% Ni 鋼の素形材は、目標寸法に対して約 5 mm の加工代をもって準備される。ロータの構成を Fig. 5-4(b)に示す。CNC 旋盤を用いて、ホイールやジャーナルなどの部位を所望の寸法に仕上げる。特に軸方向のホイール間距離および軸の直径に関して、寸法公差の許容値が小さく設定されている（例えば、ホイール間距離 $2,400 \pm 0.13$ mm、直径部の寸法 $1,250 \pm 0.05$ mm）。ホイール部の旋削のうち、個別に加工された羽根を軸に一体化させるため、溝や穴の加工がロータに施される。ラジアル方向に羽根を挿入する場合は、Fig. 5-4(c)のようにダブルテール型の溝に嵌合させる。すべての羽根が組み立てられた Fig. 5-4(d)の状態で、タービンシステムの運転に向けた精密なバランス調整などが行われる。

ホイールの特徴的な突き出し形状に着目すると、オンマシンで座標計測システムを配

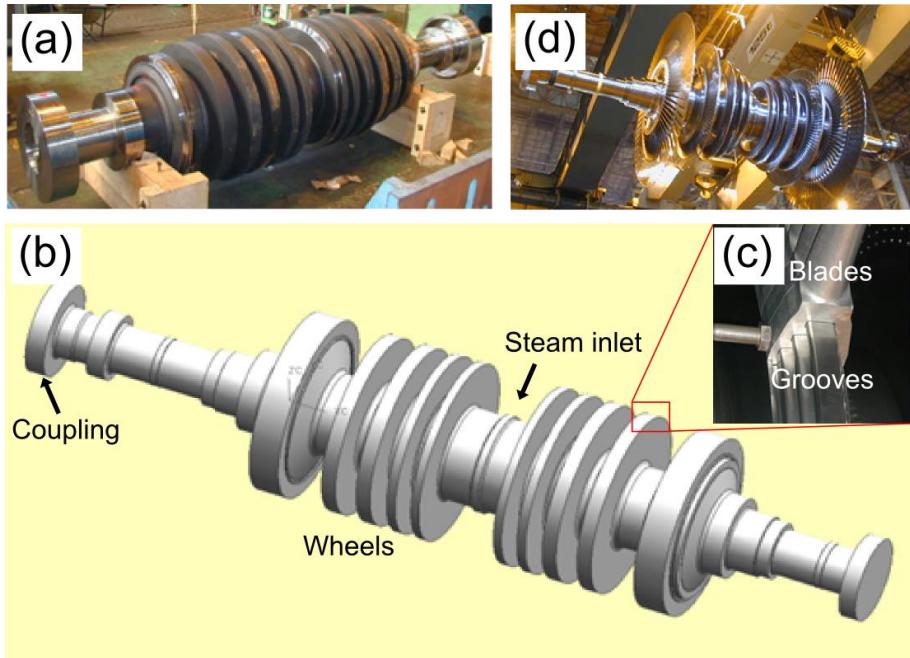


Fig. 5-4 Outline of the manufacturing steps for a steam turbine rotor: (a) forged rotor, (b) design configuration, (c) assembly of blades, and (d) fully assembled rotor.

置する場合の制約が大きいことが明らかである。切削工具は、ホイール間の軸径部まで移動して加工するため、長さ計測を目的とした光学系を配置する場合、光路の遮蔽を避けることが難しい。そのため、精密測長に広く用いられるレーザ干渉計のような相対距離の計測原理では、遮光のたびに原点位置の確認が必要となってしまう。前述したように本研究では、部分的にリアルタイム補正の優先度を高める計測戦略を採る。次項では、ロータのオンマシン計測における代表的な事例を具体化し、システム構築の方針を述べる。

5.3.2 システムの主な要素

一般的なマシニングセンタと比べ、大型工作機械ではオフラインで空間精度の校正を行う場合に、計測機器の設置場所には比較的余裕がある。一方で、工作物がある場合のオンマシン計測では、所望の寸法に適した計測戦略に基づいて、各要素の配置を注意深く決める必要がある。大型 CNC 旋盤に統合されたオンマシン計測システムの概要を Fig. 5-5 に示す。旋盤は単一または複数の往復台を備え、機械の駆動範囲内で Z 軸ベッドに沿って精密位置決めが行われる。大型旋盤の場合、工作物や工具ホルダなどを柔軟に設置できるよう、主軸の中心は床面から数 m 高い位置に配置される。CNC 制御装置に位置信号をフィードバックするリニアエンコーダは往復台の下部に備えられる。したがって、機械構造における熱ヒステリシスや経年変化が、幾何学的なアッベ誤差やコサイン誤差（傾斜成分による測長誤差）に加わり、トレーサビリティの確保を難しくしている。アッベ誤差に関しては、計測機器と計測対象を同一軸上に配置した場合、アッベの原理に基づき幾何学的な誤差が最小となる。しかしながら、大型工作機械の位置決め系では、

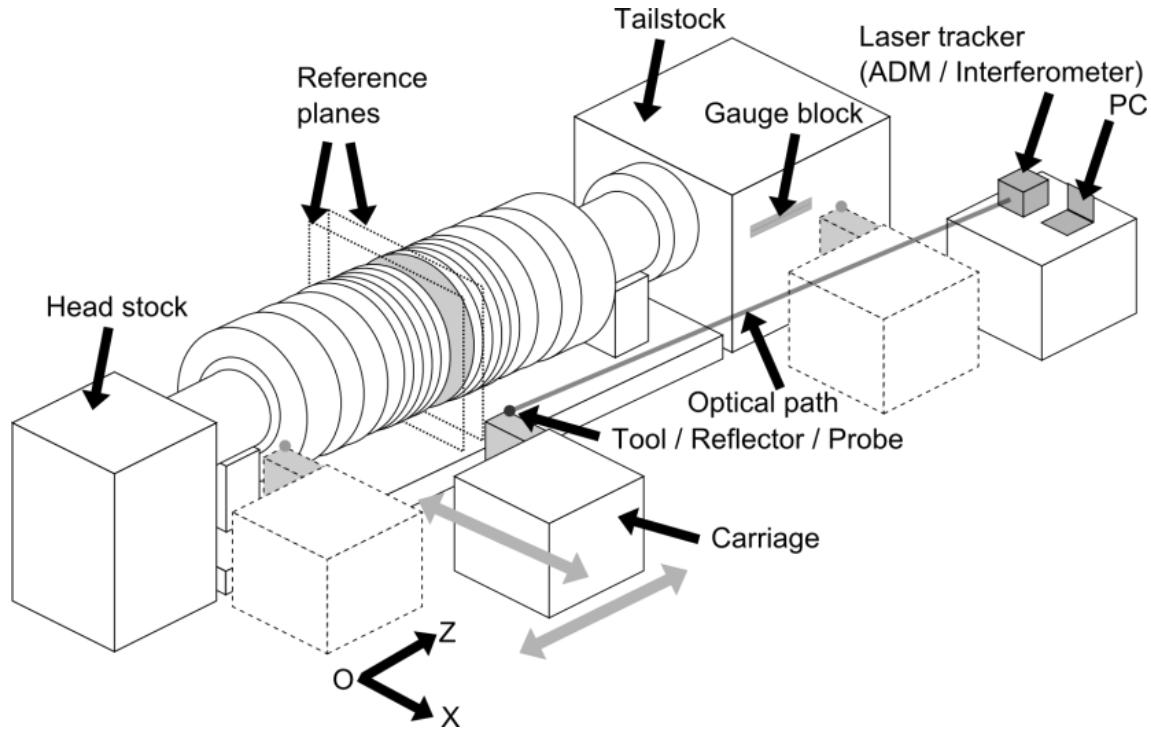


Fig. 5-5 Schematic illustration of the proposed on-machine measurement system.

この条件を満たす構成は少ない。同様に、外部の測長機器を用いる場合にも、機器の設置場所や向きが計測不確かさに与える影響に配慮する必要がある。また、ロータの中心軸が通る XZ 平面内で接触式の計測を行うため、工具保持部に対して、可換式インターフェースで切削工具ホルダとプローブホルダを接続できる構成とした。

5.3.2.1 長さ計測系と測長軸のアライメント

絶対距離計 (Absolute distance meter, ADM) またはレーザ干渉計の配置を想定した長さ計測系の光路は、通常コサイン誤差を低減する設置の工夫が必要である。例えば、 1° のアライメント誤差がある場合、1 m あたり 0.15 mm 大きい値を得る。そこで、ソフトウェアで任意の空間座標系を定義できるレーザトラッカの機能を活用する。大型工作機械上では、往復台の XZ 軸の移動を用いて、トラッカ座標系と機械座標系のアライメントを行うことができる。市販のレーザトラッカに組み込まれている ADM は、 $\pm 10 \mu\text{m}$ 程度の精度と測長距離に依存した不確かさを有する。さらにいくつかのモデルでは、高精度なレーザ干渉計を ADM と同軸に備え、校正などに用いることができる。しかしながら、所望の精度を得るためにには、前節で言及したとおり、計測原理を考慮してレーザトラッカの配置に注意を払う必要がある。文献[15]では、極座標における測距方向の精度が高い反面、水平面内の方位角方向にトラッカ固有の系統的誤差を含むことが示されている。また、エンコーダの分解能の制約を受けて方位角・仰角方向の微小量の計測は、長距離ほど難しくなる点に留意する必要がある。レーザトラッカによる厳密な空間精度評価に関しては、測長機器[16]や基準平面[17]の校正システムの研究において議論が進められている。これらの背景を考慮し、レーザトラッカの長さ計測の精度を維持できるように、計測方向とヘッドの配置を規定して不確かさを低減する方針とした。

5.3.2.2 位置決めとプロービング

プロービング手法に関しては、工作物の幾何形状と表面状態を考慮して選択する必要がある[18]。蒸気タービンロータの場合には、寸法公差は比較的単純な形状の部位に付与されている。例えば、中心軸に垂直な平面間の距離などである。光学式プローブは平滑面の精密計測には広く用いられるが、ロータでは酸化皮膜に覆われた素形材から精密仕上げ面までに、大幅な表面性状の変化があることに留意すべきである。したがって、タッチトリガプローブが最も汎用的かつ高精度を確保できる手法と考えられる。

プローブ球の位置決めは、旋盤の XZ 軸の移動に基づく。オンマシン計測ではプローブ球の空間位置決めに関して、理想的な位置に対する系統誤差と非系統誤差を含むことが知られている[2]。前者は機械構造に関する不整合や静的な熱変形の影響、および非剛体的特性が要因である。後者は機械の動的特性に関連し、直接的にプローブの位置決め不確かさに影響するため、補正することができない要素である。

5.3.2.3 絶対長さの校正の仕組み

大型機械加工ショップでは環境の影響が大きいため、長さ校正の手順に配慮が求められる。ADM とレーザ干渉計はレーザトラッカの内部センサによって環境変動に対する補償システムを備えるが、ロータの計測においては、標準温度である 20 °C における換算長さを決定する点が最も重要である。ここでは、芯押し台の上に Z 軸と平行に設置したスチール製のブロックゲージを、温度変化を補償する参照として用いる。大型マイクロメータを用いた計測では、線膨張係数の見積りが難しいため、便宜的に工作物と計測器が同一の熱膨張・収縮を受けることを仮定する場合もあるが、両者は材料内部のばらつきや線膨張係数の差によって乖離の可能性がある。これに対し、ブロックゲージは公称長さに対する誤差が校正されており、線膨張係数の不確かさが付与される場合もある。

5.3.2.4 空間誤差の考慮

ロータのホイール位置計測の模式図を Fig. 5-6 に示す。点線のプローブ球は空間誤差がない場合、実線は誤差を含んだ実際の位置を示している。システムはオフライン状態で取得した空間誤差と、工作物を搭載した状態でのプローブ球軌跡の系統的な誤差 (Z 軸位置に依存) の両者を活用する。つまり、位置 i のように、プロービング点において測長光路が遮蔽される場合には、あらかじめ取得した空間誤差の活用が適しているのに対し、光路が確保される範囲ではレーザトラッカの追尾機能によって、その場での空間誤差補正が原理上可能である。ただし、X 軸移動時の Z 方向の誤差を活用する場合は、レーザトラッカの方位角方向の回転動作を含めた不確かさに配慮する必要がある。計測対象の寸法 L_{act_i} は、次式のように表すことができる。

$$L_{act_i} = (L_{tracker_0} - L_{tracker_i}) + (\mathbf{E}_{r_0} - \mathbf{E}_{m_0}) \cdot \mathbf{e}_z - (\mathbf{E}_{r_i} - \mathbf{E}_{m_i}) \cdot \mathbf{e}_z \quad (5-1)$$

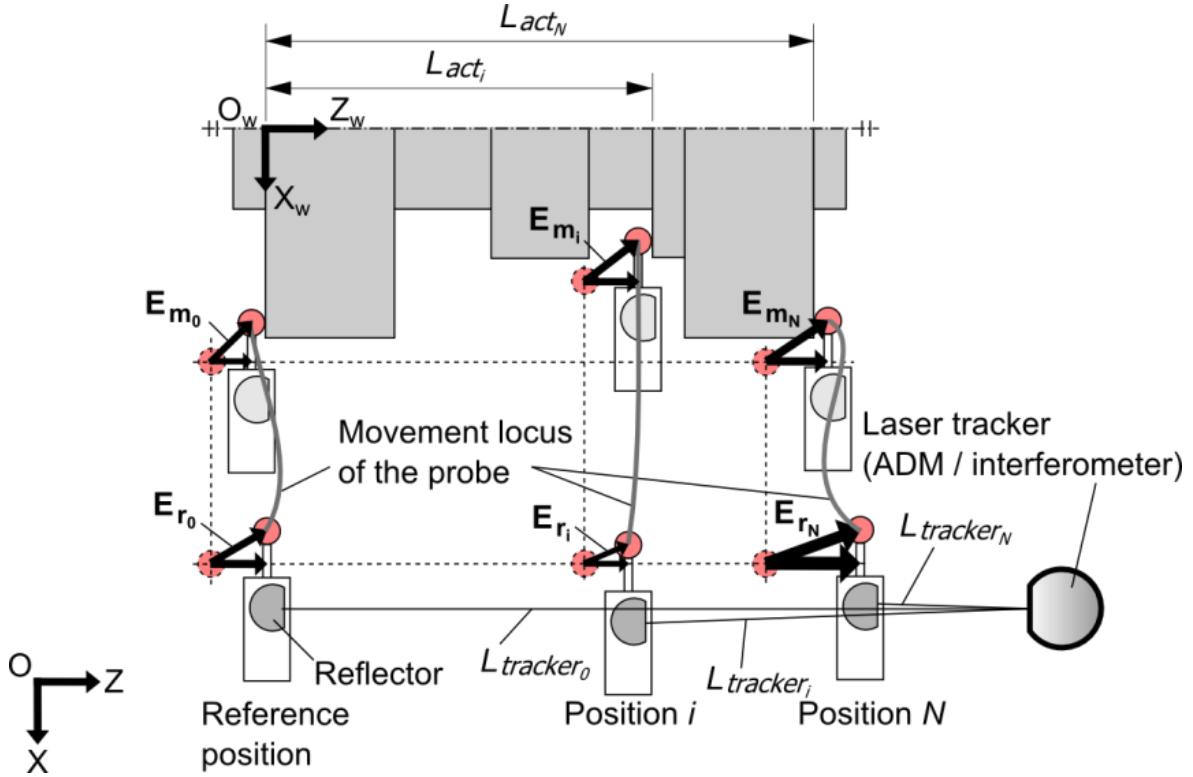


Fig. 5-6 Measurement of axial-wheel positions using a laser tracker. $O-Z-X$ is the machine coordinate, and $O_w-Z_w-X_w$ is the workpiece coordinate.

ここで、 $L_{tracker_i}$ と $L_{tracker_0}$ はレーザトラッカによる計測値であり、 E_{r_0} 、 E_{m_0} 、 E_{r_i} 、と E_{m_i} は空間誤差ベクトル、 e_z はZ方向の単位ベクトルを示す。ここで、1番目の添字の‘m’と‘r’は、それぞれ計測・退避位置を意味し、2番目の添字は計測点の番号を表している。X方向の退避距離が全駆動距離に対して十分小さい場合を考えると、隣接する空間誤差ベクトル (E_{m_i} と E_{r_i}) はほぼ等しいとみなすことができる。このとき、空間誤差ベクトルのZ方向成分は1軸のピッチ誤差と一致し、軸方向のホイール位置を決める主な成分となる。

また、ロータ軸部の直径計測に関しては、Fig. 5-7(a)に示すように、工作物の中心軸が往復台の座標系に対して傾斜するアライメント誤差が生じる可能性があり、計測結果への影響が大きい。この誤差は、大型の工作物において芯押し台を用いる際の拘束状態に起因し、工作物ごとに状態が異なるため、あらかじめ予測することが難しい。例えば、同一の直径を有する点Aおよび点Bでプロービングした場合、計測結果は傾斜に依存した誤差を含む。あらかじめ参考部位の計測を行うことでこの傾斜は補正できるが、Fig. 5-7(b)のように、Z軸移動時のX方向の真直度の影響が参考部位間で残ることがわかる。大型工作機械では数mにわたって真直度を一定に保つことが難しく、特に旋削時の軸径に対しては絶対値が2倍で反映されるため、公差が厳しい場合は管理が必要である。これを高い精度で補正するには、往復台のZ軸運動を、レーザトラッカの方位角方向の回転動作で計測する配置が考えられる。前述のように、方位角・仰角方向の回転動作が主となる場合は、不確かさの見積りが必要である。文献[15]では、サブ μm の回転精度を

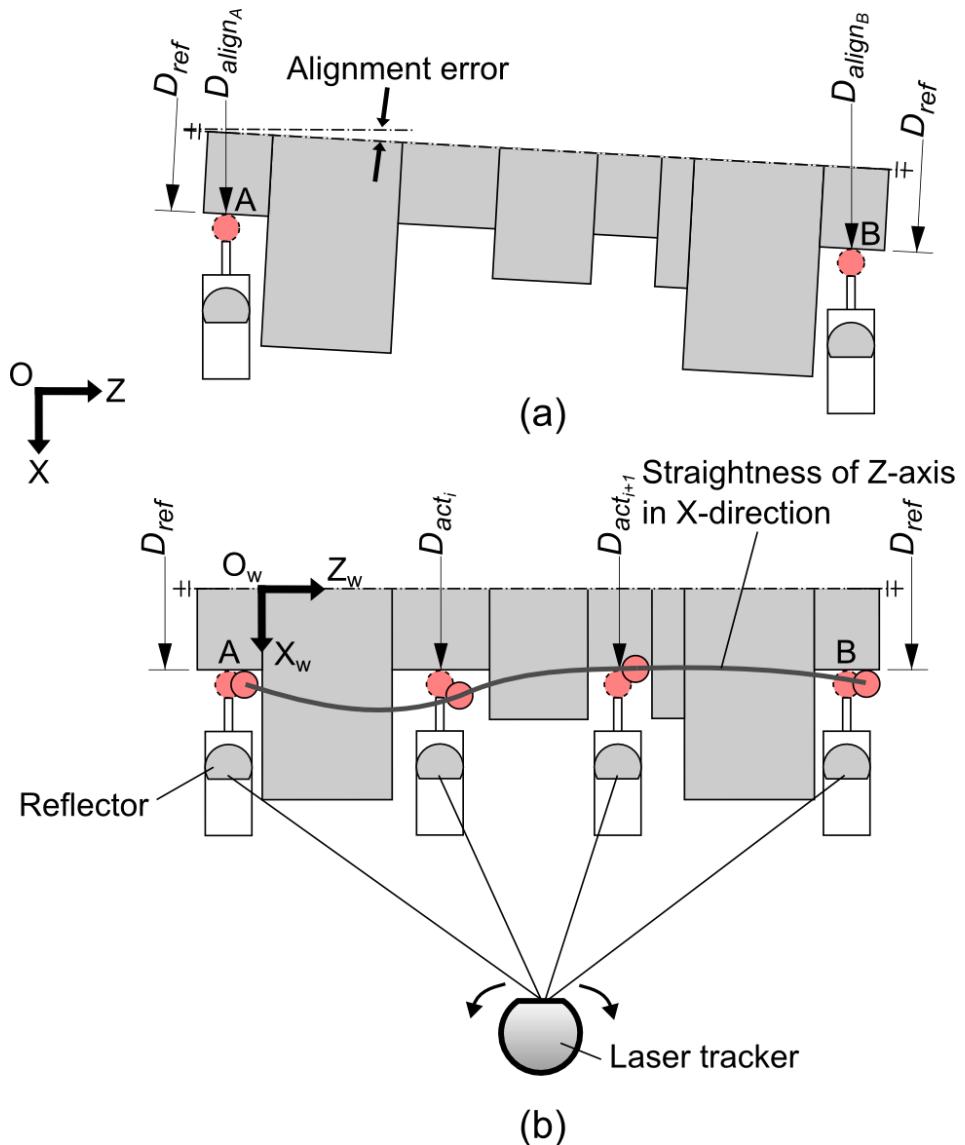


Fig. 5-7 Measurement of the shaft diameter considering (a) the alignment error and (b) the straightness of the Z-axis in the X-direction.

もつ空気静圧軸受を用いて、レーザトラッカの方位角方向の測長ばらつきを評価し、5つの市販機種に対して誤差の最大値が $3.4 \mu\text{m}$ であったことを報告している。目標の軸径精度 ($\pm 50 \mu\text{m}$) に対して十分に小さいと考えられるため、工作物の正面から、X 軸方向のプローブ球（往復台）の軌跡を捉える方針を採用した。

5.4 長さ計測の検証実験

5.4.1 回転対称体の旋削工程

大型 CNC 旋盤を用いて、提案したシステムを実際の製造工程において検証する。工作物となる全長 11 m の低圧ロータを旋盤に搭載した状態を Fig. 5-8(a)に示す。工場内では、クレーンでロータを吊り下げ機械加工ショップの上を搬送する形をとるため、建屋の空間は広くとられる。工作機械を個体ごとに包囲するような精密な温調システムは備わらないことが多い、外気温変動の影響を取り除くことも難しい。しかしながら、工作物の回転、軸移動などの動作精度に直結する要素である、油静圧軸受、スライドなど、油が供給される部位に関しては温度制御がなされている。特に回転主軸側のスピンドルと、ロータの重量を支持するジャーナル部の静圧軸受は、高い回転精度を維持するのに必須である。往復台の位置決めに関しては、X 軸・Z 軸のそれぞれを 0.001 mm 単位で指令できるが、実際の再現性は、計測の不確かさに影響を与える。旋削仕上げ加工では、ツールホルダに保持された超硬合金製チップを使用した。工具摩耗などの影響によって、加工後のホイール位置は指令座標に対するばらつきをもつ可能性があるため、加工と計測を継ぎ目なく行えるオンマシン寸法計測が重要といえる。

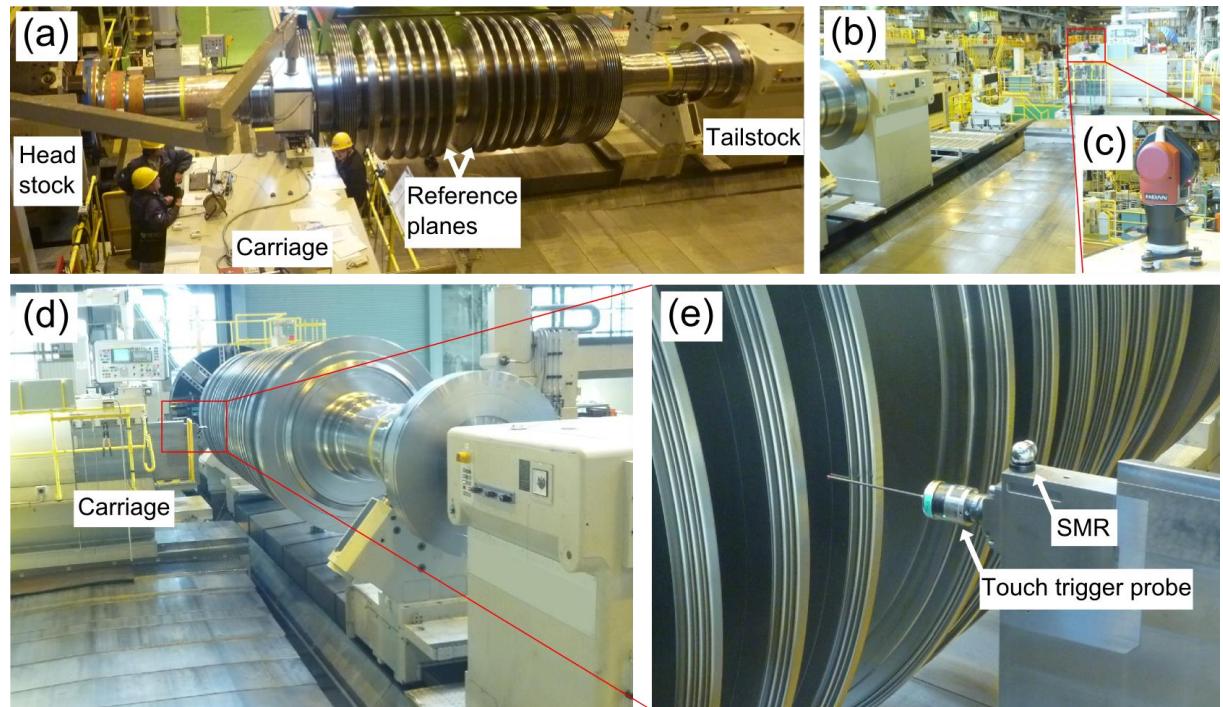


Fig. 5-8 Photograph of the on-machine measurement system. (a) Workpiece and a large CNC lathe. (b) View from the carriage to the tailstock side. (c) Laser tracker mounted on another carriage that is stationary during the experiment. (d) View from the laser tracker side to the carriage. (e) Enlarged view of a touch-trigger probe attached to a lamella and an SMR fixed aside.

計測実験は、旋削によるホイール仕上げが完了した状態で実施し、可搬型の大型マイクロメータによって、あらかじめホイール間距離を計測した。一連の工程では、設計寸法に対する過剰な削り込みが発生すると、製品の損失に直結する可能性がある。そのため、誤加工を未然に防げるよう、加工プログラムや寸法の検証手順を詳細に設定している。

5.4.2 回転対称体の寸法計測実験

さまざまな環境下でロバストな補正が行えることを検証するため、標準温度として考える 20°C に対して、およそ 12°C の環境で実験を行った。単一素材からなる工作物だけでなく、複合要素からなる工作機械の各部位に寸法の収縮が生じている。例えばロータの評価寸法に関しては、 2.4 m のホイール間距離に対して、測長への影響が約 0.2 mm 発生する。したがって、その場で適切な長さ校正を施す必要がある。計測中は一様な温度であることを仮定するが、長期間にわたる計測を行う場合には、工作物や工作機械に対する温度分布や変動の影響をモデル化し、不確かさを予測する仕組みも必要となる。

5.4.2.1 長さ計測装置

長さ計測に用いたレーザトラッカ (Automated Precision Inc. Radian) を Fig. 5-8(c) に示す。追尾ターゲットである球状反射鏡 (Spherically mounted retroreflector ; SMR) は、Fig. 5-8(e) のようにラメラとよばれる、ホイール間の軸径部分を干渉なく加工するための薄板状の支持板の上に、マグネットベースを用いて固定した。鋼製の球内に 3 面体プリズムが埋め込んであり、球の中心において、入射光を入射光と平行に 180° 方向に反射することで、レーザトラッカとの距離を計測する。レーザトラッカは ADM と干渉計を同軸に備える。干渉計の He-Ne レーザは $0.08\text{ }\mu\text{m}$ の分解能と 0.5 ppm の精度を有し、ADM はそれぞれ $0.1\text{ }\mu\text{m}$ と 10 ppm である。計測中に光路の遮蔽が発生しない限り、測長情報は精度が高い干渉計が優先される。計測環境における気温や気圧の変動に対しては、センサによる補償機能が備わっている。レーザトラッカのメインユニットは、三脚などを使用して、他方の往復台や機械周辺の床面に設置する。この際、設置場所付近の熱源や振動源 (例えば、油温調整器、圧縮機、他の工作機械など) の影響がないように注意を払った。Fig. 5-9 にシステムの構成を示す。レーザトラッカの機構制御と測長情報の取得は PC で行う。また、無線式精密温度収集システム (Testo Saveris)，および CNC 装置 (ファナック Series 30i) との通信機能に関しても、PC 内の専用ソフトウェアに統合した。CNC 装置で実行されたプログラムによって、主軸回転や軸移動の指令、およびプローブの制御が行われる。球状反射鏡を追尾するロックオン状態にしたのち、往復台の軸移動を利用してトラッカ基準の直交 3 軸座標系を構築する。Fig. 5-10 に示すように、工作物の長さ方向に十分大きい距離をあけて 2 点計測により Z 軸を規定し、X 方向に移動させて追加で 1 点を計測することで、工作機械の座標系に適合した、レーザトラッカ座標系を設定できる。

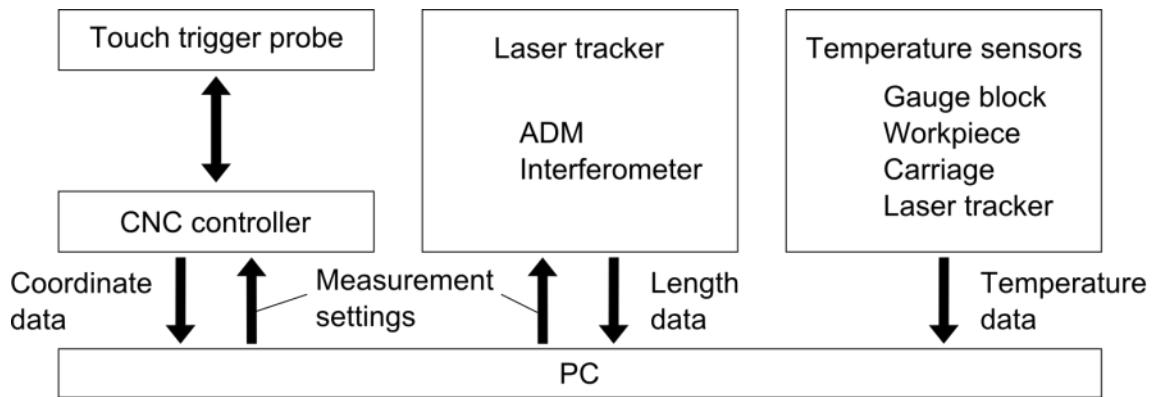


Fig. 5-9 System diagram.

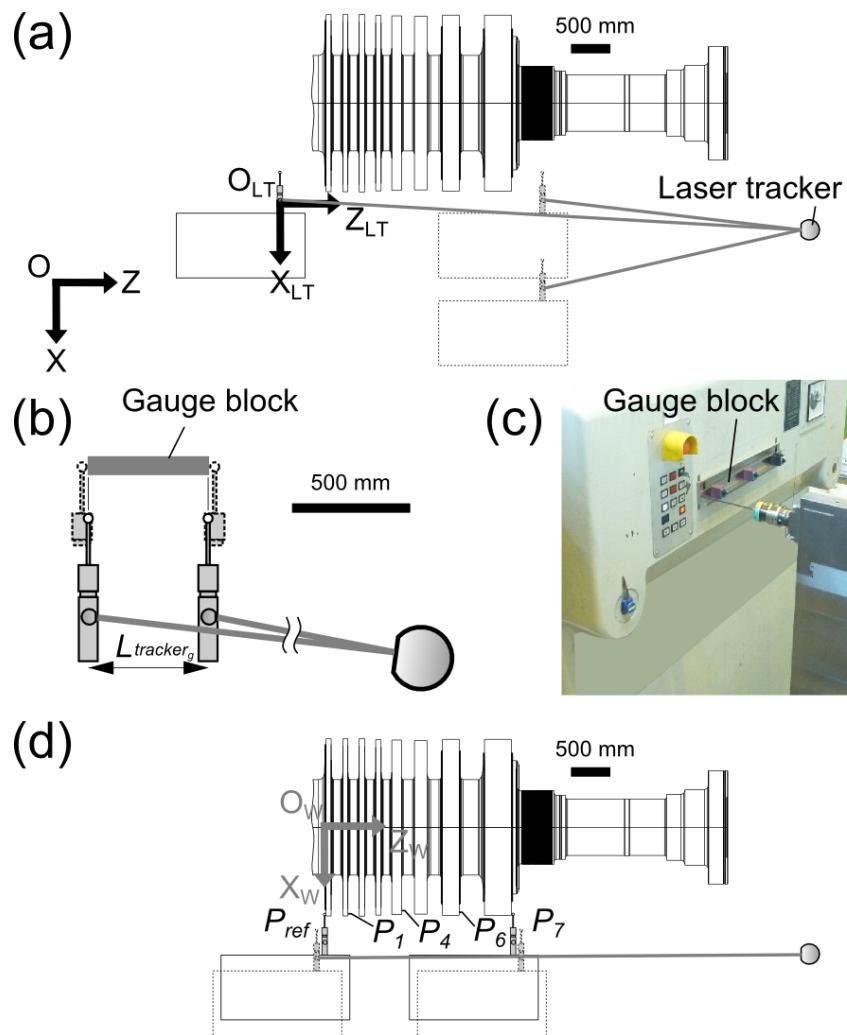


Fig. 5-10 Experimental setup. (a) Laser tracker coordinate aligned parallel to the machine coordinate. (b) Calibration step. (c) Photograph of the gauge block as a calibration artefact. (d) Measurement of wheel positions.

5.4.2.2 プローブと校正用アーティファクト

寸法計測用のプロービングシステムはさまざまなものがあるが、3次元計測における再現性と角度方向の異方性が特に重要となる[18]。実験では直径 6 mm のルビー球と、長さ 200 mm のシャフトからなるスタイルスを、異方性の影響をサブ μm に抑えたひずみゲージ式タッチトリガプローブの本体 (Renishaw RMP600) [19]に取り付けた。ラメラとプローブ本体の接続部分は、多角形テーパ形状と 2 面拘束構造により、交換時の高い再現性 (約 $\pm 2 \mu\text{m}$) をもつ。CNC プログラムによって、CNC 装置はプローブ機能の有効化・無効化を制御するだけでなく、接触検知のためのシーケンスや接近パラメータを設定できる。計測値は CNC 装置に一時的に記録され、PC に転送される。

Fig. 5-10(b)および(c)にロックゲージによる校正手順を示す。呼び値 500 mm の鋼製ロックゲージ (ミツトヨ) は、芯押し台の側面に Z 軸と平行となるように固定した。仮の計測としてロックゲージの両端をプロービングしたのち、左右方向それぞれのシフト量のパラメータを設定し、工作機械の座標系における計測値を 500 mm に合わせた。レーザトラッカの座標系はこの時点で機械座標系とアライメントされており、ロックゲージの絶対長さに対応する L_{tracker_g} は、往復台の移動で計測できる。例えば、11.5 °C で計測する場合、標準温度である $T_{\text{std}} = 20^\circ\text{C}$ での校正值に対して、実際の長さは収縮の影響を受けた小さい値をとる。そこで、スケーリング係数を導入し、20 °C におけるホイール間距離の換算値を求めた。長さ校正の概要を Table 5-1 に示す。同一点のプロービングの再現性は 1 μm 以下と小さく、工作機械はオンマシン計測に適した位置決め特性であるといえる。干渉測長の不確かさは、3 次元計測に関するレーザトラッカの校正值 (3.6 $\mu\text{m}/\text{m}$) に基づいて見積った。これは Fig. 5-10(b) のように、ロックゲージの設置位置付近で計測する際に、ヘッドの回転移動を伴うことを考慮したもので、不確かさの主な要因を占めた。これらの要因を組み合わせた拡張不確かさ ($k = 2$) は 7.8 μm であった。

Table 5-1 Uncertainty related to probing and length calibration.

Source of uncertainty	Uncertainty ($k = 2$)
Unidirectional repeatability of probing at a point ^a	0.47 μm
Unidirectional repeatability of probing at a point ^b	0.97 μm
Repeatability of measurement of the gauge length ^c	1.8 μm
Length-measuring interferometer ^d	7.2 μm
Length of gauge block ^e	2.2 μm

^a Readout from CNC controller, carriage travel < 100 mm.

^b Readout from CNC controller, carriage travel > 1000 mm.

^c Five successive measurements with an hour interval.

^d Calibrated value of the laser tracker 3D volumetric accuracy, less than 2-m distance.

^e Dimensional deviation of the 500-mm gauge block.

5.4.2.3 計測手順

長さ校正の完了後、ホイールの軸方向位置の計測を実施した。寸法計測点の位置関係を Fig. 5-10(d)に示す。蒸気流入口に対して対称形状のロータにおいて、中央部の隣接する 2 面の P_{ref} を参照点とする。プロービングは植え込み形状の端部から 3 mm 離れた平面部で行う。レーザトラッカによる計測は、プロービング点から X 方向に 200 mm 離れた退避位置（点線）で、Z 方向にプローブと工作物の干渉がない状態で行う。このとき、X 方向の退避距離は X 軸の全駆動範囲と比べて十分に小さいため、隣接する空間誤差ベクトルの差異は無視できる。したがって、絶対測長に関する項のみ計測結果に反映する。機械座標系の計測結果は CNC 装置に記録され、レーザトラッカの計測値と合わせて PC 内で演算する。

5.4.3 結果と考察

計測された寸法値は、標準温度である $T_{std} = 20^{\circ}\text{C}$ における値ではないため、次式で示すスケーリング係数を用いて変換した。

$$\mu = L_{tracker_g} / L_{calibrated_g} \quad (5-2)$$

ここで、 $L_{calibrated_g}$ はブロックゲージの校正長さであり、標準温度 T_{std} に対する換算長さ L_{act_i}' は次式で表される。

$$L_{act_i}' = (L_{tracker_0} - L_{tracker_i}) / \mu \quad (5-3)$$

Table 5-2 に計測結果の代表値を示す。スケール補正を考慮した値は許容公差 ($\pm 0.13 \text{ mm}$) を満たしていること確認できる。Fig. 5-11 に校正不確かさの影響を併記した計測結果を示す。また、Fig. 5-12 にはシステムによる 2 回の繰り返し計測と、手動マイクロメータ計測の比較結果を示す。設計形状は参照面を基準として対称であるが、誤差のパターンは非対称である。これはロータの仕上げ工程に長期間を要し、許容公差内のホイールの仕上げ位置は、任意に決定されているためである。オンマシン自動計測によって、優れた再現性が得られているだけでなく、計測器と工作物の両者に均一な線膨張係数を仮定した、手動計測の結果に対してもよい傾向の一致を示す。

Table 5-2 Representative measurement results of the axial-wheel position (unit: mm).

Position	Nominal value	L_{act_i} w/o SC ^a	Error w/o SC	L_{act_i}' with SC ^b	Error with SC
$P_{.7}$	-2425.020	-2424.824	0.196	-2425.052	-0.032
$P_{.4}$	-986.520	-986.424	0.096	-986.517	0.003
P_4	986.520	986.435	-0.085	986.528	0.008
P_7	2425.020	2424.902	-0.118	2425.130	0.110

^aScale correction (SC) converts the lengths in the actual environment to those in the standard temperature.

^bScaling factor $\mu = 0.999906$.

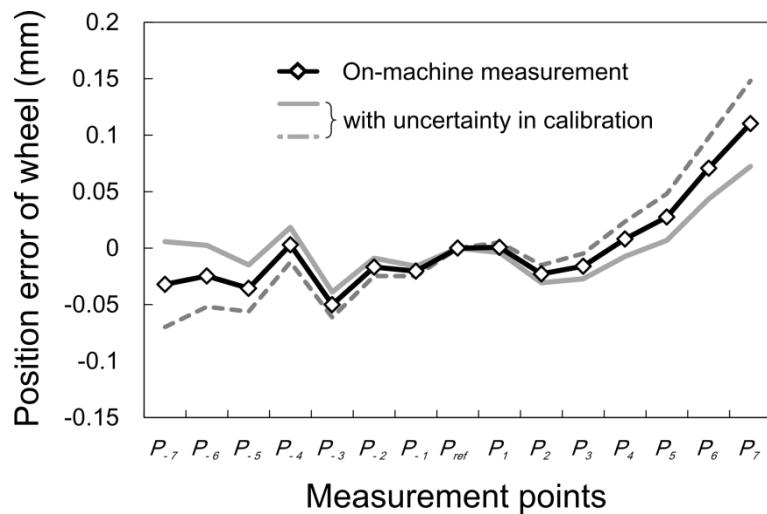


Fig. 5-11 Experimental results of the length measurement with scale correction.

次に、オンマシン計測で用いた長さ計測系に対して、Z 軸方向の測長特性を検証するため、単独軸の校正用レーザ干渉計システムを用いた計測をオフラインで行った。レーザ干渉計 (Agilent 5529A) と、レーザトラッカによる Z 軸位置決めに関する比較結果を Fig. 5-13 に示す。レーザトラッカに対しては、前述したオンマシン計測の環境 (11.5 °C) における 2 回の繰り返し結果、レーザ干渉計は標準温度である 20 °C に換算された誤差量を表示している。レーザ干渉計の計測は、工作物が搭載されていない状態で、オンマシン計測とほぼ同等の温度環境下 (12 °C) で別の日に実施した。レーザ干渉計システムでは、工作機械系が均一の線膨張係数をもつと仮定して補正結果を算出しているため、関連する不確かさを考慮した検討を加えた。ISO230-2[20]では、位置決め精度試験における不確かさの要因を規定しており、Table 5-3 に示すように、各要因の寄与度を見積ることができる。Fig. 5-13 の灰色の点線は、これらの不確かさの影響を仮定したものである。標準温度 $T_{std} = 20$ °C に対して、低温側に 10 °C の低下を想定した場合、レーザトラッカの測長結果とよい一致をみせている。局所的には Z 軸位置の 5000-6600 mm で差異がみられるが、これらは計測時の室温分布の差などに影響されたものと考えられる。

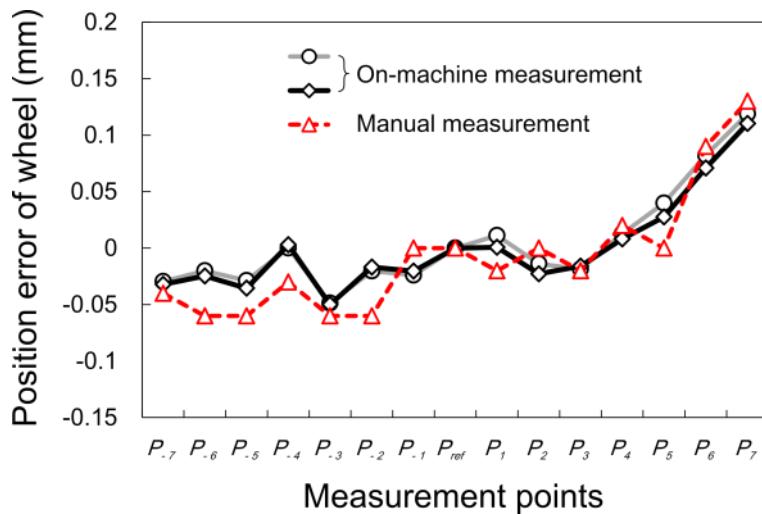


Fig. 5-12 Experimental results of the length measurement with scale correction.

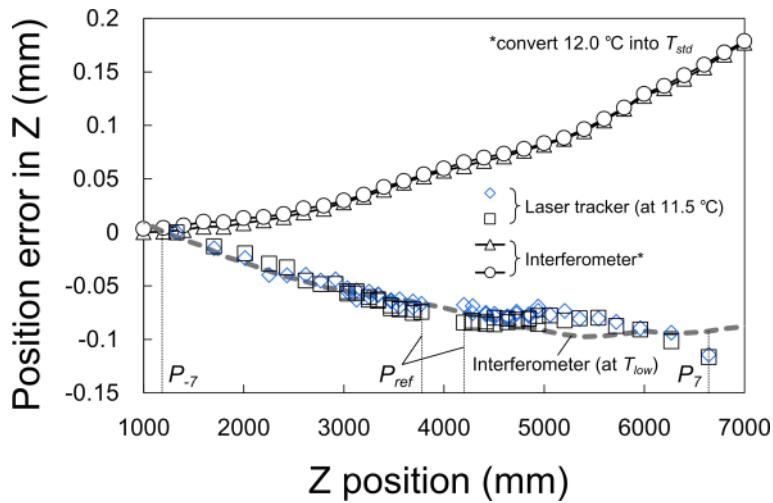


Fig. 5-13 Comparison between the Agilent 5529A interferometer and the laser tracker.

Table 5-3 Example of uncertainty budget estimated for the length-measuring interferometer using environmental compensation.

Source of uncertainty	Formula	Standard uncertainty
U_{DEVICE}	$0.6 \times R_{DEVICE} \times L$	$2.8 \text{ } L \mu\text{m}$
$U_{M, MACHINE\ TOOL}$	$0.6 \times \alpha \times L \times R(\theta)$	$28 \text{ } L \mu\text{m}$
$U_{E, MACHINE\ TOOL}$	$0.6 \times \Delta T \times L \times R(\alpha)$	$36 \text{ } L \mu\text{m}$
Combined uncertainty	$46 \text{ } L \mu\text{m}$	

where $R_{DEVICE}=4.65 \mu\text{m}$, $\alpha=11.7 \mu\text{m}/\text{m} \cdot \text{K}$, $R(\theta)=\pm 2^\circ\text{C}$ (uncertainty of temperature measurement), $\Delta T=10^\circ\text{C}$ (deviation from 20°C), $R(\alpha)=\pm 3.0 \mu\text{m}/\text{m} \cdot \text{K}$ (uncertainty of coefficient of thermal expansion), and L is in metres. U_{DEVICE} is the uncertainty of the length-measuring instrument. $U_{M, MACHINE\ TOOL}$ represents the uncertainty due to temperature measurement. $U_{E, MACHINE\ TOOL}$ represents the uncertainty related to the coefficient of thermal expansion.

5.5 空間補正の検証実験

5.5.1 工作物の設置誤差の影響

軸方向のホイール位置計測に続き、直径計測の実現性を検証する。ここでは工作物として、Fig. 5-14(a)に示すホイールのアスペクト比が比較的小さい、高压タービンロータを用いる。ホイール直径部の設計値と許容公差は $817-877 \pm 0.05$ mm である。実験に用いたCNC旋盤は前節のものとは異なるため、機械の駆動距離や空間誤差に関する特性は差異がある。しかし、加工に関わる基本的な機能と軸構成は同じである。ロータは2個のジャーナル軸受に支持された状態で、回転主軸に固定される。前述のように、CNC旋盤のX軸・Z軸の直角度などの幾何誤差とは独立に、工作物がZ軸に対するアライメント誤差をもつ可能性がある。工作物の傾斜量に関しては、空間誤差の観点からの補正を行うことができないため、参考位置において複数手法の比較計測を行う。つまり、Fig. 5-14(b)の評価部分の両端に位置する P_1 と P_{18} を参考直径として、タッチプローブと大型マイクロメータの両者の計測値を利用する。この実験は、標準温度に近い環境(19-22 °C)で実施した。そのため、前項の実験と比較して温度環境の寸法値への影響は小さい。以上の要因が小さい場合でも、空間誤差の分布が直径計測に影響をおよぼす可能性がある。そこでこれらを把握するため、空間誤差のオフライン計測実験を行う。

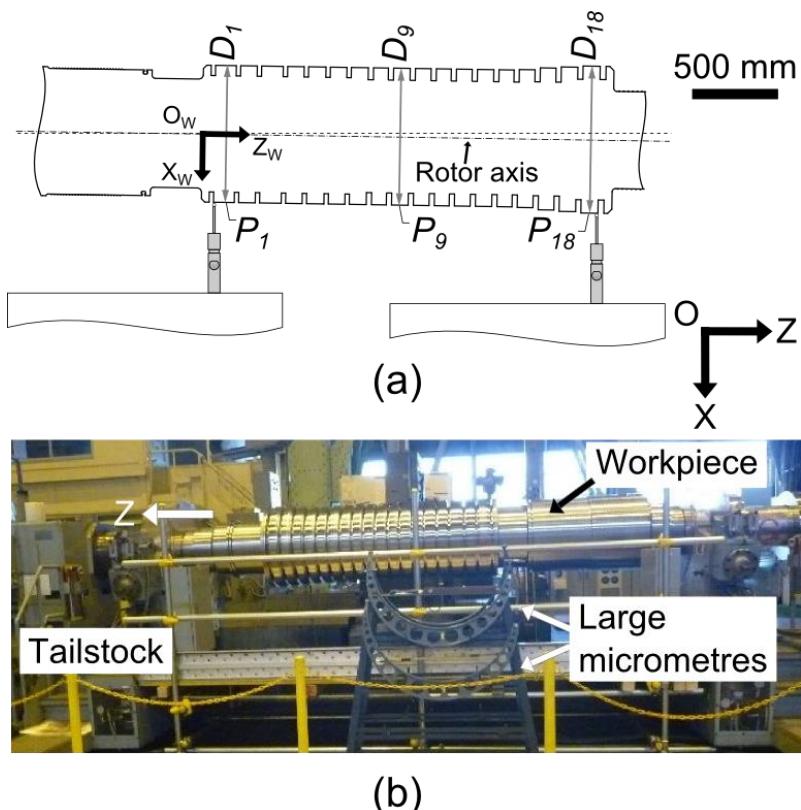


Fig. 5-14 Experimental arrangements for diameter measurement. (a) Rotor configuration. (b) Overview of a high-pressure rotor loaded on a CNC lathe.

5.5.2 空間誤差のオフライン計測実験

傾斜成分が補正され工作物の座標系が適切に設定された状態においても、Fig. 5-7(b)に示したように、真直度に関する誤差 ZTX は直径値に直接的に影響をおよぼす。ここでは VDI/VDE 2617[21]にしたがい、1 文字目は移動軸、2 文字目は並進 (Translation)，3 文字目は並進する軸を表す。XTX のように同一文字の場合、直線位置決めを表す。一方で XTZ と ZTY の直径値に対する影響は小さい。例えば、誤差 ZTY が 0.5 mm ある場合でも、直径値の変動は $0.6 \mu\text{m}$ である。このような直線軸のピッチ誤差以外の空間成分を包括的に計測するため、変位計測とマルチラテレーションに基づいた、レーザトレーサ (Etalon) による計測実験を行った。計測ヘッドの設置状態を Fig. 5-15(a) に示す。1 軸の計測を取り扱う直接法に対して、レーザトレーサは μm オーダの不確かさでより短時間に空間誤差を計測できる。CNC 旋盤は直交する 2 軸のみで構成されるため、Fig. 5-15(b) のように仮想的な Y 軸を用いた擬似的な 3 次元計測を適用し、マルチラテレーションによる演算を成立させた。複数回の計測におけるレーザトレーサの設置位置と、計測対象である反射鏡の移動軌跡を Fig. 5-15(c) に示す。実験中の温度は 19-20 °C であった。

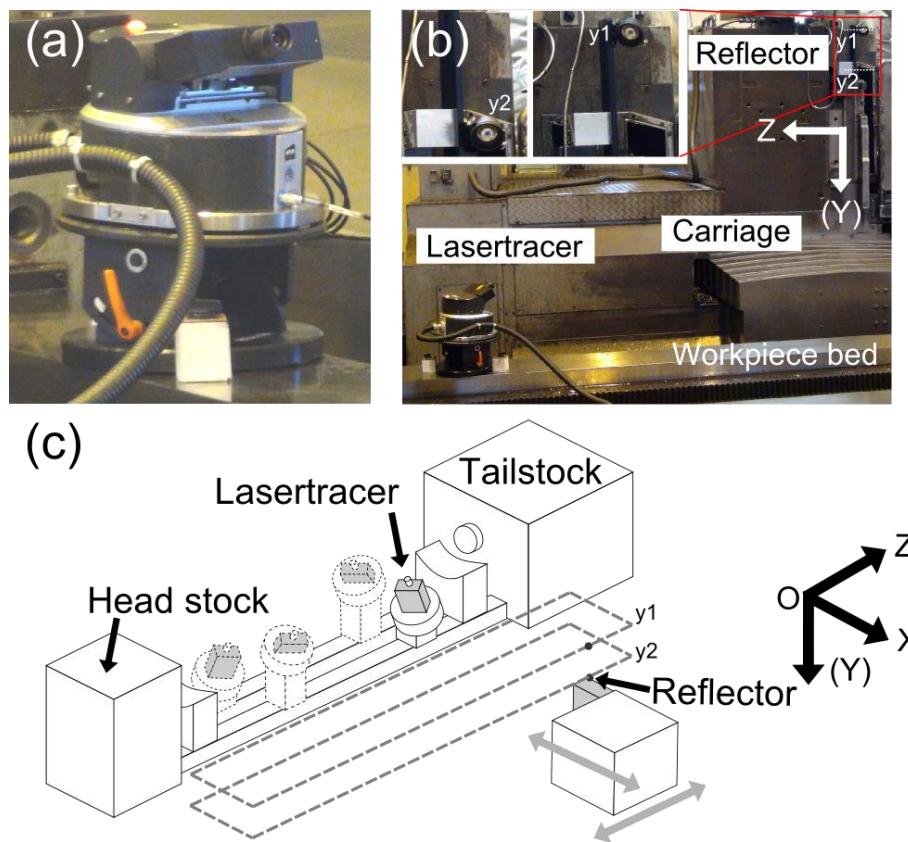


Fig. 5-15 Indirect volumetric error measurement for an unloaded machine tool: (a) Lasertracer mounted on a workpiece bed, (b) tracking a cats-eye reflector fixed on the carriage, and (c) schematic of the arrangements and reflector paths.

演算に必要な4回の計測のあと、ソフトウェア（Etalon TRAC-CAL）で直線位置決めおよび真直度、ピッチ・ヨー・ロール誤差、直角度誤差を算出した。結果の一部をFig. 5-16に示す。XTZとZTYの真直度は直径計測に実質的に影響を及ぼさないのに対して、ZTXは-7000 mm付近の変曲点で計測した場合には明確な寸法差が生じる。XTXの直線位置決めに関しては、直径の相対計測に必要な駆動範囲が約30 mmであるため影響は小さい。算出された不確かさの概要をTable 5-4に示す。旋盤では機器配置の制約と、擬似的な3次元計測を適用したことにより、ZTXやZTYの不確かさが比較的大きいが、μmオーダーで空間誤差を把握することが可能であった。

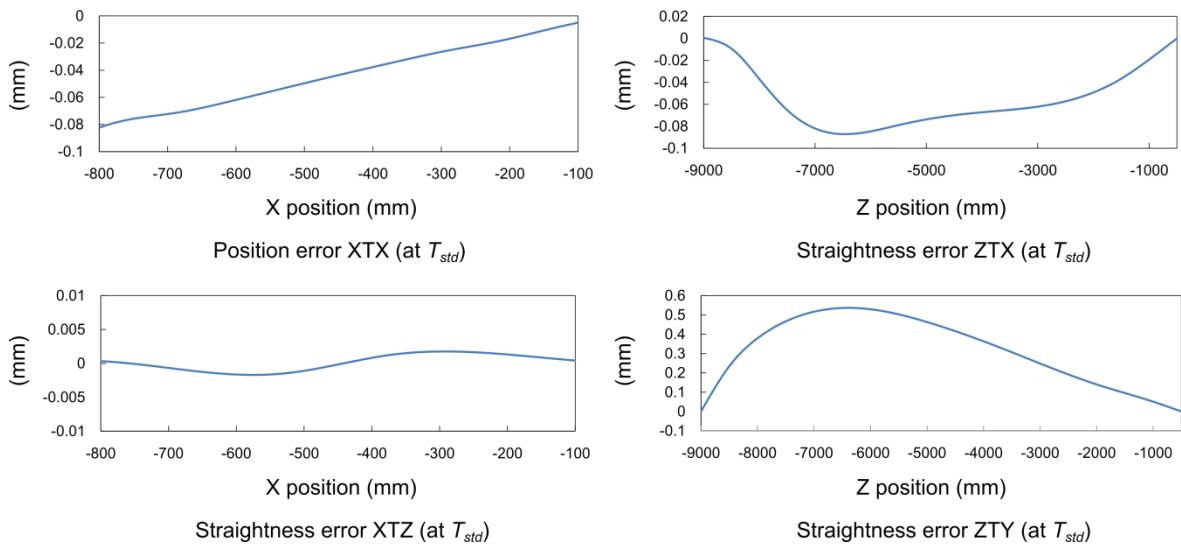


Fig. 5-16 Results of the multilateration by the Lasertracer.

Table 5-4 Uncertainty parameters related to the Lasertracer measurement.

Error	Uncertainty ($k = 2$)
Position error XTX	1.3 μm
Straightness error XTZ	0.8 μm
Straightness error ZTX	5.1 μm
Straightness error ZTY	8.6 μm

5.5.3 真直度のオンマシン計測実験

ZTXの真直度が直径計測に重要であることから、工作物を搭載した状態での往復台の運動精度を把握するため、Fig. 5-17に示すオンマシン計測の段取りを適用した。レーザトラッカは前節で使用したものと同じであり、ロータの前面に三脚を用いて設置した。トラッカ座標系は、Fig. 5-17(a)に示す3点によって設定した。計測対象となる球状反射鏡は、往復台のラメラ下部にFig. 5-17(b)の状態で固定し、直径計測の対象部位を含む2400 mmのZ軸駆動範囲に対して、200 mm間隔で真直度を計測する。レーザトレーサによ

り算出した真直度と、オンマシンのレーザトラッカ計測を合わせて表記した結果を Fig. 5-18 に示す。レーザトラッカを工作物の正面に設置して ZTX の真直度を計測する場合は、方位角方向の測長不確かさに留意する必要がある。ここでは、5.3.2 で述べた、空気静圧軸受を用いた測長ばらつき評価[15]による誤差の最大値を、計測の不確かさとして考慮する。工具中心の近傍に反射鏡を設置したレーザトレーサに対して、オンマシンの真直度計測では、球状反射鏡を工具位置より約 1 m 下部に設置した。両者の真直度計測結果は、およそ 0.02 mm の差を生じているが、このような設置状態の影響と、それぞれの実験時点での、工作機械の温度分布による影響が混在しているものと考えられる。これらの要因を明らかにするためには、経時変化などについてさらに調査が必要である。しかしながら、レーザトラッカによるオンマシン計測に関しては、工作物が積載された条件において、往復台の真直度を高い再現性で評価できることがわかった。

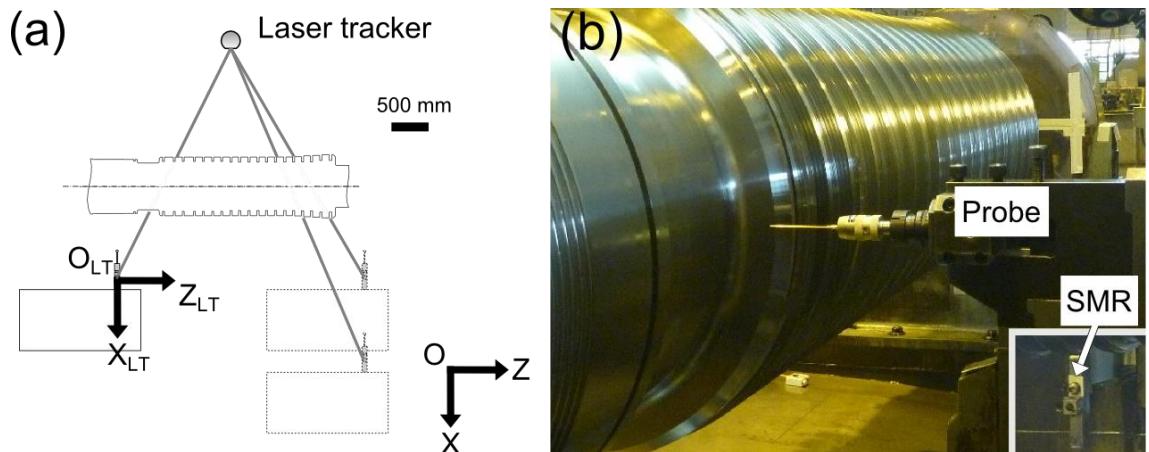


Fig. 5-17 Experimental arrangements for diameter measurement: (a) definition of coordinate and (b) touch probe and a SMR fixed on a lamella.

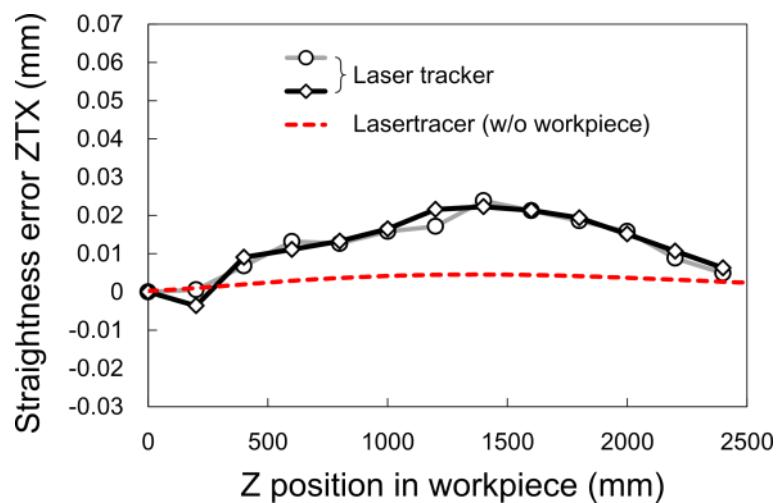


Fig. 5-18 Experimental results for straightness measurement.

5.5.4 結果と考察

直径計測を実現するため、プローブで接触検知した機械座標値に対して、レーザトラッカで評価した ZTX の真直度を用いて補正した。補正結果と手動計測による結果を比較したものを Fig. 5-19 に示す。ロータ軸の機械座標値に対するアライメント誤差は、参照点の P_1 と P_{18} においてプローブと手動計測で評価し、その点での誤差がないものと仮定している。両者の結果は最大で 0.028 mm の差をもつものの、傾向は良好な一致をみせる。直径計測に関する不確かさの見積りを Table 5-5 に示す。手動マイクロメータによる参照点の計測では、比較的大きい不確かさが生じてしまうが、プローブによる計測では高い再現性を維持できる。標準温度である 20 °C と異なる環境で計測する場合、前節のような長さ校正手順が求められるが、直径計測における適切なアーティファクトの形状は、工作機械への取り付けの制約などを考慮して、今後検討していく必要がある。また、真直度計測における工具中心軌跡をより正確に評価できる計測機器の配置方法も課題と考えられる。

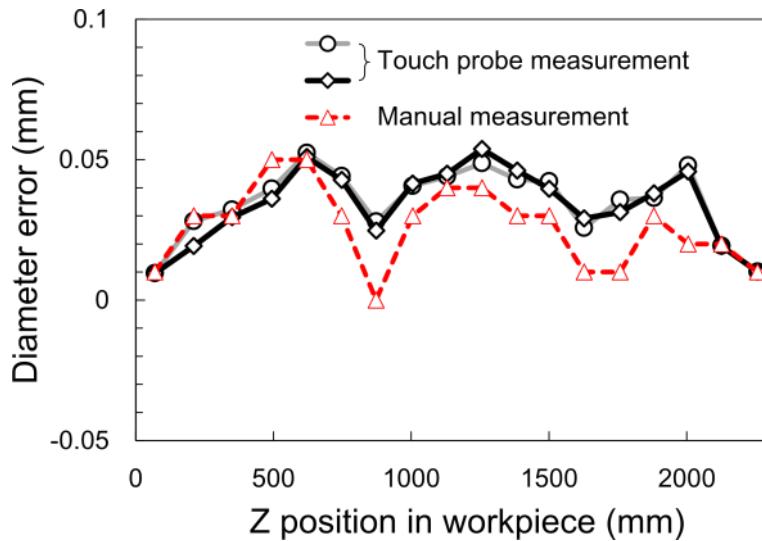


Fig. 5-19 Experimental results for straightness measurement.

Table 5-5 Uncertainty related to the diameter measurement at standard temperature.

Source of uncertainty	Uncertainty ($k = 2$)
Repeatability of probing	3.5 μm
Straightness measurement ZTX (Laser tracker) ^a	3.4 μm
Reference measurement ^b	20 μm

^aMeasurement uncertainty of ranging errors as a function of azimuth in commercial laser trackers. A maximum value of the residual error of several tested trackers is shown according to [15].

^bUncertainty of a manual instrument at 800–900 mm from a catalogue [22].

5.6 結言

大型精密部品の加工・計測プロセスを高精度化・合理化することを目指し、大型工作機械の空間補正によるオンマシン寸法計測システムを開発した。計測の基本原理を提示したのち、大型 CNC 旋盤を対象として、長さ計測系、プローブ、校正用アーティファクトによるマルチセンサ協調型のシステムを構築し、 10^{-5} と高い相対寸法精度が求められる蒸気タービンロータの寸法計測の事例において、工場環境下における工作機械の空間誤差を考慮して、ホイール位置や軸径の計測の仕組みを検証した。長さ計測では、工作物の収縮が大きい環境条件において、最大 2.4 m の評価寸法に対して、手動計測とシステムによる自動計測がよい一致を示し、環境変動に対するロバスト性が確認された。直径計測では、寸法値に直接的に影響を与える真直度誤差に関して、レーザトラッカによる再現性の高いインライン計測を実現し、手動計測と空間補正を用いた自動計測が良好な一致をみせた。計測実験においては、レーザトラッカの不確かさを考慮してオンマシン計測システムに融合することで精度を確保し、その妥当性をオンラインの計測・校正法である単独軸のレーザ干渉計、およびレーザトレーサにより検証することができた。

参考文献

- [1] ISO/TR 16907:2015 Machine tools -- Numerical compensation of geometric errors 2015
- [2] Schwenke H, Knapp W, Haitjema H, Weckenmann A, Schmitt R, Delbressine F. Geometric error measurement and compensation of machines—An update. *CIRP Annals* 2008;57:660–75.
- [3] Mayr J, Jedrzejewski J, Uhlmann E, Alkan Donmez M, Knapp W, Härtig F, Wendt K, Moriwaki T, Shore P, Schmitt R, Brecher C, Würz T, Wegener K. Thermal issues in machine tools. *CIRP Annals* 2012;61:771–91.
- [4] Tan B, Mao X, Liu H, Li B, He S, Peng F, Yin L. A thermal error model for large machine tools that considers environmental thermal hysteresis effects. *Int J Mach Tools Manuf* 2014;82-83:11–20.
- [5] Estler W T, Edmundson K L, Peggs G N, Parker D H. Large-scale metrology—An update. *CIRP Annals* 2002;51:587–609.
- [6] Weckenmann A, Jiang X, Sommer K-D, Neuschaefer-Rube U, Seewig J, Shaw L, Estler T. Multisensor data fusion in dimensional metrology. *CIRP Annals* 2009;58:701–21.
- [7] Cuypers W, Van Gestel N, Voet a., Kruth J-P, Mingneau J, Bleys P. Optical measurement techniques for mobile and large-scale dimensional metrology. *Opt Lasers Eng* 2009;47:292–300.

- [8] Muralikrishnan B, Sawyer D, Blackburn C, Phillips S, Borchardt B, Estler WT. ASME B89.4.19 Performance Evaluation Tests and Geometric Misalignments in Laser Trackers. *J Res Natl Inst Stand Technol* 2009;114:21–35.
- [9] Schwenke H, Franke M, Hannaford J, Kunzmann H. Error mapping of CMMs and machine tools by a single tracking interferometer. *CIRP Annals* 2005;54:475–8.
- [10] Goch G, Knapp W, Härtig F. Precision engineering for wind energy systems. *CIRP Annals* 2012;61:611–34.
- [11] Wendt K, Franke M, Härtig F. Measuring large 3D structures using four portable tracking laser interferometers. *Measurement* 2012;45:2339–45.
- [12] Wang Z, Maropolous P G. Real-time error compensation of a three-axis machine tool using a laser tracker. *Int J Adv Manuf Technol* 2013;69:919–33.
- [13] Ibaraki S, Yuasa K. A ‘movable’ machine tool with long coarse linear axes under real-time volumetric error compensation by a laser tracker. 6th International Conference on Positioning Technology (ICPT2014) 2014:472–474.
- [14] Shiraishi M. Scope of in-process measurement, monitoring and control techniques in machining processes—Part 2: In-process techniques for workpieces. *Prec Eng* 1989;11:27–37.
- [15] Muralikrishnan B, Lee V, Blackburn C, Sawyer D, Phillips S, Ren W, Hughes B. Assessing ranging errors as a function of azimuth in laser trackers and tracers. *Meas Sci Technol* 2013;24:065201.
- [16] Unkuri J, Rantanen A, Manninen J, Esala V-P, Lassila A. Interferometric 30 m bench for calibrations of 1D scales and optical distance measuring instruments. *Meas Sci Technol* 2012;23:094017.
- [17] Ma L, Wang L, Cao T, Wang J, He X, Xiong C. A large-scale laser plane calibration system. *Meas Sci Technol* 2007;18:1768–72.
- [18] Weckenmann A, Estler T, Peggs G, McMurtry D. Probing systems in dimensional metrology. *CIRP Annals* 2004;53:657–84.
- [19] Renishaw RMP600 catalog
- [20] ISO 230-2:2006, Test code for machine tools—Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled axes 2006.
- [21] VDI/VDE 2617. Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung. <http://www.vdi.de/2617>
- [22] Specification of Large Micrometers. <http://www.sharpfine.com/Micrometers/large-micrometers.html>

第6章 結論

本研究では、エネルギー機器などの社会基盤の構築で高い需要が見込まれる、大型かつ精密な機械加工部品を対象とし、製造工程における合理的な生產品質の保証を目的として加工・計測システムの開発に取り組んだ。大型工作機械を用いた製造工程は、一般的な工作機械と比べて複雑な制約条件が加わることで、品質の不適合につながる可能性を含んでいる。そこで、これらを総合的に解決するため、マルチセンサ融合型システムの枠組み、およびシステムの展開戦略を提案した。加工監視システムでは、びびり振動の異常検知法、および工具・加工表面性状に関する包括的な異常検知法の技術的な可能性を見出し、オンマシン計測システムでは、工作機械の空間誤差を考慮したトレーサブルな寸法計測法の有用性を確認した。以下に本論文の内容を総括する。

第1章「緒論」では、精密加工システムの基本要素である、工具・工作物・工作機械を起点にして、要素間の境界において、製品の生產品質に直結する課題が存在することに着目し、「切削加工における動的特性の監視技術」、「切削加工における工具と加工表面性状の監視技術」、「大型精密部品のオンマシン計測技術」の3件をシステム化の主題とし、「加工・計測システムの統合管理」をシステム間の連携・活用の重要課題と位置付けて、関連研究の歴史・背景と本研究の目的を述べた。

第2章「加工・計測システムの大型精密部品への展開戦略」では、総合的な生產品質の保証を目的とした加工監視・オンマシン計測システムに関して、主な課題である「複合的な振動現象における特徴抽出」、「多品種少量生産の加工条件管理法」、「環境変動下のトレーサブルな計測」に対して、それぞれを「先端的な信号処理法」、「マルチセンサ融合」、「マルチセンサ協調」の枠組みで開発する方向性を導いた。展開戦略に関しては、製造工程の特性を考慮してシステムの導入で得られる利点を明らかにし、蒸気タービン発電機の製造において、工作機械にシステムを実装した。これらの仕組みは異常検知や品質保証に有用であることが確認されている。さらに、システム間の結合・統合管理に関しては、加工・計測プロセスのモデル化・予測技術と、システムにより得られた情報を連携することによる、品質管理ループの実現を将来像として、概念図に提示した。

第3章「時間周波数解析によるインプロセスびびり振動検知」では、複合的な振動現象を含むプロセスに対して、新たな信号処理法に基づく加工監視システムを提案した。具体的には、加速度信号に対してSTFTとSKを組み合わせた時間周波数解析を適用し、びびり振動と過渡事象に関わる成分に関して、その場でエネルギー要約図として抽出する手法を考案した。実際の切削プロセスでは、びびり周波数の時間変化や、衝動性の波形などの複合的な要因を含むため、高精度な異常検知が難しいという問題があったが、提案した手法により、蒸気タービンロータの精密ドリル加工工程において、工具の損傷にいたる状態遷移を正確に追跡できる可能性を示した。

第4章「工具摩耗・加工表面性状のマルチセンサ融合型異常検知」では、工具や加工

表面の損傷が問題となるプロセスにおいて、関連する情報を包括的に収集し、高い精度で状態を推定するため、マルチセンサ融合方式に基づく加工監視システムを提案した。センサの検出特性と大型工作機械への実装性を考慮し、主軸モータ電流と AE の特徴量の状態遷移を利用した加工監視法を選定した。多品種少量生産品では、誤判定を含みうる枠組みでは適用が難しいため、工具寿命試験で特徴量と異常状態の関係を明確化し、粗・中仕上げ・仕上げのような複数の工程に対して閾値を管理する仕組みが要点となる。検証実験では、蒸気タービンロータの溝入れ工程を対象とし、粗工程で工具の摩耗傾向を正確に追跡できるほか、AE は仕上げ工程の表面異常に対して高い検出感度が得られる可能性を示した。

第 5 章「大型工作機械の空間補正によるオンマシン寸法計測」では、工作機械上で継ぎ目のない加工・計測を実現し工程を合理化するため、環境変動下におけるオンマシン寸法計測を主題とし、マルチセンサ協調によるトレーサブルな計測システムを提案した。空間誤差と環境変動に対する補正の仕組みを提示したのち、大型 CNC 旋盤を対象として、長さ計測系、プローブ、校正用アーティファクトを統合したシステムを構築した。 10^{-5} と高い相対寸法精度が求められる蒸気タービンロータの寸法計測において、ホイール位置や軸径の計測の仕組みを検証し、実用上十分な精度が得られることを示した。さらに、既存の計測・校正法との比較検証を含め、提案手法の妥当性を精査した。

本論文では、大型精密部品の製造工程における加工・計測プロセスの情報を最大限に利用して総合的な生産品質の保証に貢献する姿を目指し、マルチセンサ融合型システムの枠組みを提示して要素技術を検証した。加工監視システムにおけるマルチセンサ融合では、異なるセンサの特徴量を活用し、切削負荷の差が大きい複数工程に対しても、単一のシステムで正確な異常検知が行えることを示した。従来の製品加工では、高い安全率を考慮した条件設定がなされており、検証では異常や状態遷移に関する情報として、工具寿命試験の結果を反映させることを前提としている。しかしながら、将来的には計測している物理量の発生原理をモデル化し、実加工の前に予測を完了している姿が望ましい。特に AE の発生要因が多岐にわたる点、および計測ばらつきの改善などを考慮し、理論・実験の両面から解明していくことが求められる。一方で、オンマシン計測システムにおけるマルチセンサ協調では、同じ「寸法」を測る目的である構成要素の配置を適正化し、空間誤差に配慮した戦略によって、従来にない高精度な計測を実現した。しかしながら、将来的にはさらに複合的な変動要因も考慮し、大型工作機械および工作物、計測系に関する不確かさの発生原理をモデル化して計測不確かさを明らかにできる姿が望ましい。温度変動のみを考えても各要素に与える影響は多様であり、多面的な検証が求められる。本論文で得られた知見の展開は、必ずしも大型精密部品に限定されることはなく、生産品質や予備部品に関する条件に厳しい制約がある、多品種少量生産の高付加価値製品に対して効果的であると考えられる。広い領域で高度な品質管理ループが実現した際には、製造業全般の管理の枠組みが大きく変化するものと思われる。

研究業績

原著論文（筆頭著者）

- Uekita Masahiro, Takaya Yasuhiro. Tool condition monitoring technique for deep-hole drilling of large components based on chatter identification in time-frequency domain. *Measurement* (投稿中)
- Uekita Masahiro, Takaya Yasuhiro. Tool condition monitoring for form milling of large parts by combining spindle motor current and acoustic emission signals. *The international journal of advanced manufacturing technology* (掲載決定)
- Uekita Masahiro, Takaya Yasuhiro. On-machine dimensional measurement of large parts by compensating for volumetric errors of machine tools. *Precision Engineering* 2016;43:200–210.

解説記事

- 上北 将広. 大型部品の製造におけるオンマシン計測. 日本機械学会誌 2015;118:690-691.
- 上北 将広. 大型部品の製造におけるオンマシン計測技術. 東芝レビュー 2016;71:52-53.

その他の原著論文

- Schmitt Robert, Uekita Masahiro, Vielhaber Karl. Focus sensor with integrated high-range slope measurement. *Measurement Science and Technology* 2009;20:117003.

謝辞

本研究は、著者が大阪大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 高谷・水谷研究室にて、博士後期課程在学中に、高谷教授のご指導のもとに行なったものであり、多くの関係者の皆様のご支援のおかげでまとめるることができました。ここに心からのお礼を申し上げたいと思います。

大阪大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 教授 高谷裕浩 博士には、論文を完成させるまでの研究活動におきまして、終始懇切丁寧なご指導を賜りました。研究の方向性や意義付けに関して常に真摯にご助言をくださったことで、問題の設定と解決への道筋を立てることができました。心より感謝を申し上げます。

大阪大学大学院 工学研究科 精密科学・応用物理学専攻 教授 遠藤勝義 博士、機械工学専攻 教授 榎本俊之 博士、機械工学専攻 准教授 水谷康弘 博士には、大変お忙しい中快く副査をお引き受けくださいり、また論文に対する貴重なご意見をいただきましたことに深く感謝の意を表します。

株式会社 東芝 生産技術センター 構造設計技術研究部 部長 大橋勝樹 氏、研究主幹 小池栄二郎 氏、研究主幹 井手秀樹 氏には、本研究の遂行に際してのご理解と、日々の多大なるご支援に対して心より感謝を申し上げます。また、本研究の実験を遂行するにあたり貴重な議論をさせていただきました、主任研究員 足立幹雄 氏、小島彰 氏に感謝いたします。

本研究の提案項目は、株式会社 東芝 エネルギーシステムソリューション社 京浜事業所にて検証を行いました。京浜事業所 機器製造部 部長 南勝則 氏、主幹 福井幸一 氏（現 東芝テクニカルサービスインターナショナル株式会社）、主幹 佐藤栄二 氏には、製造現場における活動に甚大なご協力をいただきましたことに、深く謝意を表します。また、実験にあたっては長谷大輔 氏、福間淳哉 氏、鈴村祥吾 氏のご支援がありました。ここに感謝申し上げます。本研究の内容は、京浜事業所の長い歴史において、先輩諸氏が苦労を重ねて築いてこられた技術・技能の蓄積なしには語ることはできず、この場をお借りして深い敬意と感謝を表したいと思います。

最後に、この活動を理解し、常に支えてくれた家族に感謝の意を表します。

2017年1月 上北 将広