

微小力の発生技術及び計測技術に関する調査研究

朱 俊方*

(2018年4月24日受理)

A Survey on Microforce Generating and Measuring Techniques

Junfang ZHU

Abstract

Microforce measurements are applied in many scientific research fields, such as material science, medicine & food science, biology and nano-material. In order to establish a microforce standard below 10 N and its traceability system in Japan, a survey is carried out in National Metrology Institute of Japan (NMIJ). First, the demand for microforce standard below 10 N is analyzed through a questionnaire survey. The result shows a lot of demands for traceability of the microforce measurement. Second, the generating techniques and measuring techniques of the microforce are summarized. The techniques of deadweight force, electromagnetic force, and electrostatic force are commonly used to generate a precise microforce. The techniques of using strain gage, resonators and capacitors are suited to the microforce measurement. Third, the efforts for realizing microforce standard made by other National Metrology Institutes are also surveyed. Finally, a plan is presented to establish the traceability system of microforce measurement at NMIJ.

1. はじめに

力計測は、材料の力学的特性評価や製品の破壊試験、耐久試験等の品質管理など、ミクロ的には原子間力、分子間力、マクロ的には鉄鋼の圧延力など、多くの分野で幅広く行われている。産業界において欠かせることができないことから、力計測は極めて重要な計測の一つであると言える。これら力計測の信頼性を確保するため、日本の国家計量標準機関（National Metrology Institute, 以下 NMI と称す）として国立研究開発法人産業技術総合研究所（以下産総研と称す）の計量標準総合センター（National Metrology Institute of Japan, 以下 NMIJ と称す）では、力の国家計量標準の開発・高度化・維持・供給を行っている。

日本の計測のトレーサビリティは、計量法校正事業者登録制度（Japan Calibration Service System, 以下 JCSS

と称す）により支えられている。力のトレーサビリティについては、図1に示すように、国家計量標準である NMIJ の力標準機、JCSS 登録校正事業者の所有する力基準機、トランスファ機器としての力計、産業界で多く使用される一軸試験機、という流れで確保されている。現在 NMIJ では、10 N から 20 MN までの範囲の力の国家計量標準が実荷重式・こうかん式・油圧式の力標準機群により実現されている^{1),2)}。また JCSS に登録している校正事業者（以下 JCSS 校正事業者と称す）に対し、力基準機や参照用の力計の校正サービスを行っている。また、力の JCSS 校正事業者からは、力基準機並びに参照用の力計を用いて、力計並びに一軸試験機の校正サービスがユーザに提供されている。ユーザは、校正された力計や一軸試験機を用いて装置開発や材料の力学的特性評価を行っている。以上のように、10 N から 20 MN までの範囲の力については国家計量標準にトレーサブルな校正体系が確立されている。

一方、近年ではマイクロ・ナノ加工技術の発展によ

*工学計測標準研究部門力トルク標準研究グループ

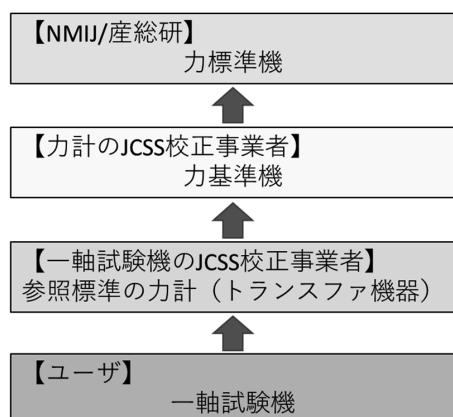


図1 力標準のトレーサビリティ体系

り、計測対象が微小になり、様々な分野で微小力の計測が行われるようになってきている。医療・食品等の研究開発分野では、ミリニュートン (mN) レベルの力計測が必要とされている³⁾⁻⁶⁾。薬品や医療食品等の安全性を確保する観点から、これら医療・食品試験片に対する圧縮・引張・粘性試験等の実施が薬局方により規定されているものもある⁷⁾。また、バイオ、ナノ物質・材料等の研究開発分野では、ミリニュートンレベル、あるいはより小さいマイクロニュートン (μN) レベル、ナノニュートン (nN) レベルの力計測が行われている^{8),9)}。例えば、ナノインデンテーションテスター (ナノインデンター) や原子間力顕微鏡 (以下 AFM と称す) による材料の力学的特性 (硬さや縦弾性係数等) の計測が報告されている^{10),11)}。また、AFM のナノインデンテーションへの適用も試みられている^{12),13)}。AFM を力学的特性評価に用いる場合、マイクロカンチレバーのばね定数が既知である必要があるが、微小力と微小変位を精密に計測することによりこのばね定数を高精度に決定する試みが報告されている¹⁴⁾⁻¹⁷⁾。

本調査研究では、以上の状況を踏まえ、医療、食品、バイオ、ナノ材料等の分野で要望のある微小力標準の早期整備を目的とし、産業界における力計測の現状、微小力標準・計測のニーズ、並びに微小力発生技術・計測技術に関する各機関の取り組みについて調査した。本報告では、まず第2章では、産業界における微小力計測の現状についての調査内容を紹介する。第3章では主な微小力の発生技術・計測技術を紹介する。第4章では、世界各国のNMIにおける微小力標準への取組みを紹介する。第5章ではNMIJにおける微小力標準に関する今後の研究計画・展望を報告する。最後に、第6章で本調査研究をまとめる。

なお、本調査研究では10 N未満の力を「微小力」と総称することとする。

2. 産業界における微小力計測の要望及び課題

2.1 微小力計測の事例

まず、企業訪問や展示会等を通じ、実際の微小力計測事例の調査を実施した。ミリニュートンレベルの力計測は、炭素繊維の引張試験をはじめ、注射針の曲げ試験、コンタクトプローブのばね定数測定、布の風合い測定、スイッチのフィーリング測定、食品の食感や食べやすさの評価などが事例として挙げられる。また、ナノインデンターやAFMによる材料の力学的特性の評価においては、マイクロニュートンレベルからナノニュートンレベルの力の計測が必要であることがわかった。

例えばある材料試験機メーカーによると、微小力計測の応用例として、繊維の引張試験、ガラス材料の曲げ試験、元素ブロック高分子材料成形の薄膜曲げ試験、電子部品の切断荷重計測、電子部品の圧入荷重計測等がある。他の事例では、材料の力学的特性評価に用いる引張試験機での繊維の引張試験、微小圧縮試験機でのガラスビーズの圧縮試験等も挙げられる。材料の力学的特性の評価並びに製品の品質管理においては、上記のような材料試験が重要であるため、微小力計測の信頼性確保が必要とされている。

2.2 アンケート調査の結果

2017年7月から8月にかけて、NMIJ力・トルク計測クラブ等を通じ、75社を対象としてアンケート調査を実施した。そのうち20社から回答をいただいた。有効回答は13社であり、図2に示すように、校正事業者4社、力計メーカー8社、エンドユーザ1社に分類された。今回のアンケート調査は主に10 N未満の力計測を対象とした。アンケート設問と回答は以下の通りである。

設問1として、力計測の用途、特に10 N未満の力計測の用途について尋ねた。微小力計測は材料、食品、製薬などの分野で応用されていることがわかった。特に、10 N未満の一軸試験機における試験力の校正が必要な業種として、製薬、食品、電気部品、半導体、医療、化学等が挙げられた。また、従来の一般的な材料の特性評価の他、品質管理のために糸の張力測定や微小ばねのばね定数測定が行われていることもわかった。

設問2として、現在行われている力計測の範囲について尋ねた。図3にその結果を示す。横軸は力の計測範囲、縦軸は企業区分を示す。破線は現在NMIJで供給できる

力標準の下限 10 N である。ほとんど全ての企業・機関が国家標準の下限より小さい範囲でも力計測を行っていることがわかった。また、今回の調査対象に限っていえば、主にミリニュートンレベルからニュートンレベルまでの力計測が多いことがわかった。

設問 3 として、力範囲ごとに必要な計測精度又は不確かさについて尋ねた。図 4 にその結果を示す。図 4 にはアンケート調査結果に加え、少数であるが、直接聞き取りにより得られた結果も含まれている。横軸は力計測のレベルであり、縦軸は必要な精度（不確かさ）である。これより、力計測に必要な精度（不確かさ）については、多くは 0.5 % ~ 1 % 程度を要求していることがわかった。JIS B 7721「引張試験機・圧縮試験機 - 力計測系の校正方法及び検証方法」では一軸試験機の校正に、同じ等級の力計を用いることを要求している¹⁸⁾。一軸試験機の等級判定基準を表 1 に示す。1 級の一軸試験機の校正には 1 級の力計を参照標準として用いなければならない。多くの力計は、JIS B 7721 の 1 級又は 0.5 級の一軸試験機の校正に使用できることを要求していることが推察される。ある校正事業者の統計によると、JCSS 校正全体で

は、1 級適合と 0.5 級適合を選択する顧客の比率は、おおむね 95 % 対 5 % である。計測の力のレンジが小さくなると、徐々に 1 級を選択することが多くなっている。

設問 4 として、10 N 未満の力計測に必要な分解能について尋ねた。図 5 に示すように、千分の一より高い分解能で計測している企業・機関が多いことがわかった。

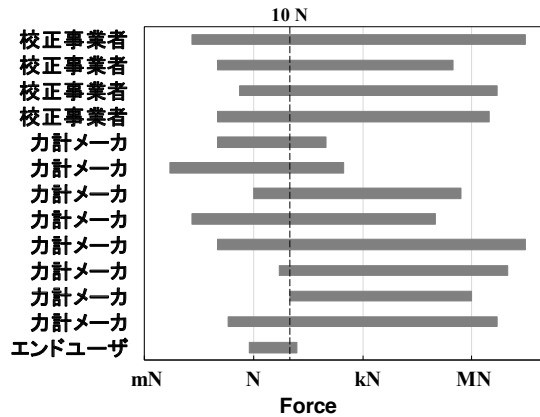
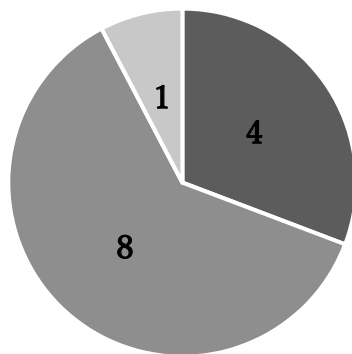


図 3 調査した各企業・機関で現在行われている力計測の範囲



■ 校正事業者 ■ 力計測器メーカー ■ エンドユーザ

図 2 力計測アンケート回答企業・機関構成

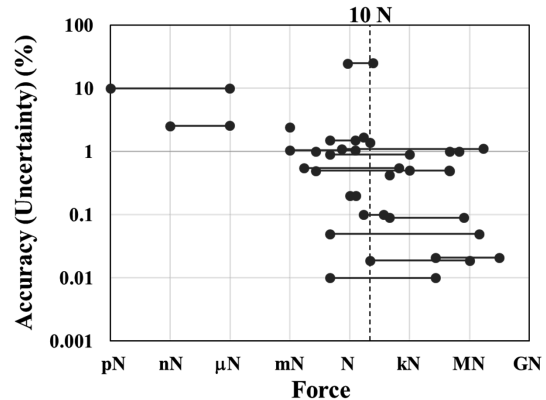


図 4 現在計測されている力レベルでそれぞれ必要な計測精度（不確かさ）

表 1 一軸試験機の等級の判断基準¹⁸⁾

試験機の等級	単位 %				
	相対指示誤差 q	相対繰り返し誤差 b	相対往復誤差 ^{a)} v	相対ゼロ誤差 f_0	相対分解能 a
0.5	±0.5	0.5	±0.75	±0.05	0.25
1	±1.0	1.0	±1.5	±0.1	0.5
2	±2.0	2.0	±3.0	±0.2	1.0
3	±3.0	3.0	±4.5	±0.3	2.0

注^{a)} 相対往復誤差の決定は、依頼者からの要求がある場合にだけ行う (JIS B 7721 の 6.4.8 参照)

すなわち計測機器に必要な分解能は、各測定レンジに対してマイクロニュートンからミリニュートン程度まで要求されている。

設問5として、力計の校正方法について尋ねた。校正方法としては10 N以下の力計に対して、質量のトレーサビリティを確保した分銅又はおもりにより定期的に校正を行っていることが分かった。校正時の負荷方法は、分銅又はおもりを重力方向で直接力計に負荷するか、負荷棒等を用いて間接的に負荷している。

設問6として、力計の校正が国家計量標準にトレーサブルである必要性について尋ねた。図6にその結果を示す。13社のうち8社からトレーサビリティが必要との回答をいただいた。また、不要と回答された2社においても力計測の校正には分銅を使用していることから、間接的に国家計量標準へのトレーサビリティが必要ということが推察された。結果として、大多数の企業が計測のトレーサビリティの必要性を主張されていることが明らかになった。

2.3 聞き取り調査の結果

アンケート調査のほか、産総研内の専門家や展示会・企業訪問等で面会した関係者に聞き取り調査を実施し、微小力計測の応用を探った。代表的な計測機器としては、マイクロ硬度計、ナノインデント、原子間力顕微鏡（AFM）がある。これらの力計測の範囲としてはサブニュートンからピコニュートン（pN）までの幅広い範囲がある。

まず、マイクロニュートンレベルからミリニュートンレベルまでの力計測を行っているナノインデントーションについて調査結果を紹介する。ナノインデントーションは、「試験方法」、「試験機の校正」、「基準片の校正

の3要素が必要になる。ここで、「試験機の校正」が問題になると考えられている。例えば、おもりで試験機を校正する場合、引張方向で校正した力計を圧縮方向に使用するのが適切かどうかという問題が存在している。また、電子天びんを参照力計とみなして校正する場合、試験機上で設置スペースの問題が生じる。以上のことから、微小力標準のみならず、寸法も定格容量も微小な力の伸介器の開発が必要であることがわかった。

次に、AFMによる材料機械特性評価の聞き取り調査結果をまとめた。従来の表面形状計測に加え、機械特性を計測する要求が多くなっていることが分かった。しかしながら、計測データに著しく大きなばらつきが生じる。装置毎に計測結果が全く異なる、という問題があることもわかった。例えば、同じ試料又はサンプルに対して異なる装置を用いた実際の測定結果間のばらつきは2倍程度にもなる事例もあるとのことであった。これには、マイクロカンチレバーのばね定数のばらつきの問題も関連している。従って、マイクロカンチレバーのばね定数を正確に計測する方法が必要となる。ばね定数の測定には、Cleveland法¹⁹⁾、Sader法²⁰⁾⁻²²⁾、熱振動法²³⁾⁻²⁶⁾等の方法があるが、測定結果のばらつきは10%から数10%程度にもなる。これらはいずれも共振周波数等から間接的に力を計測している方法である。今後、高精度な微小力計測技術の発展により、力を直接計測することで測定誤差を低減できる可能性がある。

ここまでで紹介した計測事例の計測精度（不確かさ）に関しては、計測の力が小さくなるにつれ、不確かさ又は誤差が大きくなる傾向が見られた。図4の調査結果から、ピコニュートンからミリニュートンレベルにおける必要な計測精度（不確かさ）は1%~10%程度であることがわかる。計測精度を向上させることにより、材料

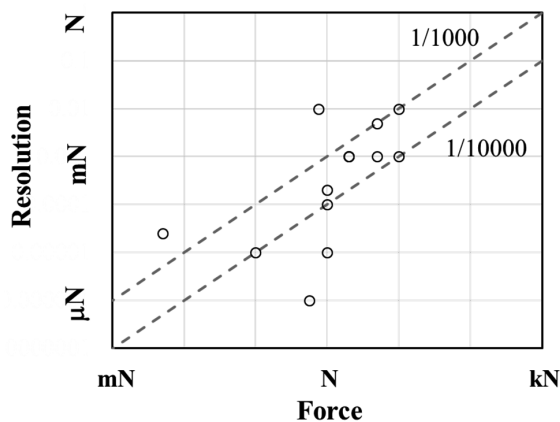


図5 現在行われている10 N未満の力計測に必要な分解能

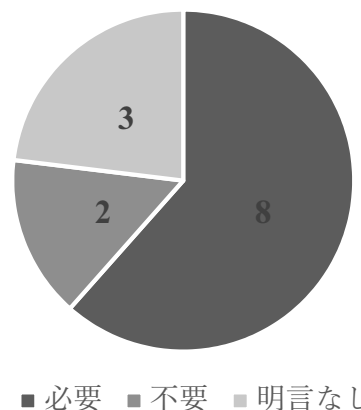


図6 力校正の国家計量標準にトレーサブルである必要性

の力学的特性の分析がより定量化しやすくなると期待される。現状では、ミリニュートンレベルをさらに下回る微小力計測の高精度化の要求は数量としては少ないながら、計測機器の校正が必要であると考えている技術者は多い。その校正の国家計量標準へのトレーサビリティが重要であるという認識も普及しつつある。従って、微小力の標準開発を進めることにより、需要が顕在化してくることも予想される。

以上の調査結果により、産業界における微小力標準への関心が高く、その立ち上げに期待がかかっていることがわかった。産業界の需要に応じて、まず、ミリニュートンレベルからの微小力標準に関する研究開発に着手することが急務である。

3. 微小力発生技術・計測技術

微小力標準の普及のためには、微小力の発生技術と計測技術の双方を開発していかなければならない。そこでここでは過去の主な技術を調査し、まとめてみた。微小力の発生（実現）並びに微小力の計測は、力の発生原理に基づき行われている。力の発生原理は、発生並びに計測の両方に用いることがある¹⁾が、ここでは、力標準の設定に使用されるような原理を力の発生技術と呼び、力計測又は仲介器として利用できる原理を力の計測技術と呼ぶこととする。

3.1 微小力発生技術

力は重力相互作用、電磁相互作用、弱い相互作用並びに強い相互作用により発生する。現在微小力の発生技術は、これらの相互作用に基づき、重力、電磁力、静電力、光放射圧、音響放射圧等を利用して研究開発されている。特に電磁力以下の技術は微小力標準の設定に適用できると期待されている。微小力標準の設定には、微小力発生機構に対し、高精度かつ繰り返しの安定性、再現性が要求されている。以下に各微小力発生技術を紹介する。

3.1.1 実荷重式

重力を利用した力の発生技術は実荷重式と呼ばれている。これはニュートンの第2法則に従い、質量 m と重力加速度 g の積により力 F の大きさを決定する。すなわち、力 F は次の式で表される。

$$F = mg \quad (1)$$

これに基づいた実荷重式力標準機はほとんど全ての国家計量標準機関（NMI）に採用されている。図7に示

すように、実荷重式力標準機では、精密に質量調整されたおもりが積み重なった重錘（おもり）に作用する重力を利用し、力を発生させる。実荷重式は、原理が簡単でありかつ既存の力標準体系に整合性があるため、微小力の発生機構にも適用できる。また、重錘の質量は質量の国家標準にトレーサブルな校正が可能である。現在、NMIJ では、質量の国家標準は最小1 mg の分銅まで整備されているため、原理的には最小約10 μN までの力を発生する重錘の質量が校正できる。なお、分銅の校正は、法定計量の規格である OIML R111 に則って行われる²⁷⁾。

一般的には、校正される分銅の質量が小さくなればなるほど、その相対不確かさが大きくなる。これは当然ながら微小力標準の相対不確かさに影響する主な要因の一つになる。また、力が小さくなると共に、図7 (a) のような第一重錘となる負荷枠の自重の制約や分銅又はおもりの寸法による加工限界等の制約が出てくる。例えば、図7 (b) に示すように、負荷枠の自重を打消すための釣合い機構の導入が必要であり、釣合い機構の感度も不確かさの大きな要因となる。さらに、機械加工技術の限界により、微小な分銅又はおもり連鎖機構を採用することが困難となってくるため、特別な連鎖機構を開発するか、連鎖でない分銅又はおもり加除機構が必要になる。

3.1.2 電磁力式

電磁力式は磁場に置かれているコイルに発生させたローレンツ力を利用する微小力発生技術である。ここでは、キップルバランス法と電磁力平衡式の2手法について紹介する。

キップルバランス法は1976年に英国のNMIである英国物理学研究所（NPL）によって提案されたものであり、電気的手段で実現された仕事率と、機械的手段で実

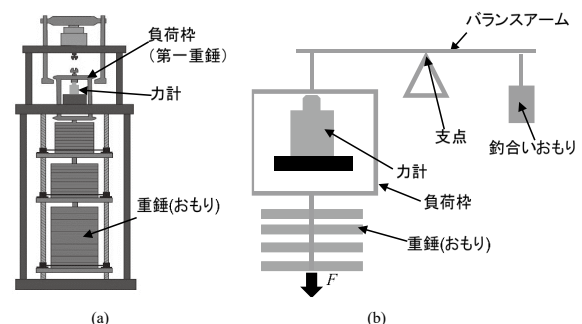


図7 実荷重式力標準機の構造
(a) 負荷枠を第一重錘とした実荷重式力標準機
(b) 負荷枠の自重を打消す実荷重式微小力標準機

現された仕事率を比較する手法である^{28), 29)}。NPL³⁰⁾⁻³²⁾をはじめ、多くのNMIがこの手法に基づいたキップルバランス（電流天びん）の研究開発を行っており、プランク定数 h の測定に用いられていた³³⁾⁻³⁸⁾。図8に示すように、この手法では静的モードと動的モードの二つの測定モードがある。静的モードでは、磁束密度 B の磁場中にある電流 I を流した長さ l のコイルに作用するローレンツ力 $F (=BIl)$ と支持棒に加えられた荷重 W を釣り合わせ、荷重 W と電流 I の関係 $W = F = BIl$ を決定する。動的モードでは、コイルを一定の速度 v で磁場に対して垂直に動かし、この時にコイルに発生した誘導起電力 U と速度 v の関係 $U = Blv$ を決定する。静的モードと動的モードにおいて、 Bl を不変量と仮定すると、次の式が成り立つ。

$$W = F = \frac{UI}{v} \quad (2)$$

通常、コイルの長さ l 及び磁束密度 B の測定は困難であるが、この手法では不要になる。コイルの移動速度 v 及びその時の誘導起電力 U 、並びにコイルに流した電流

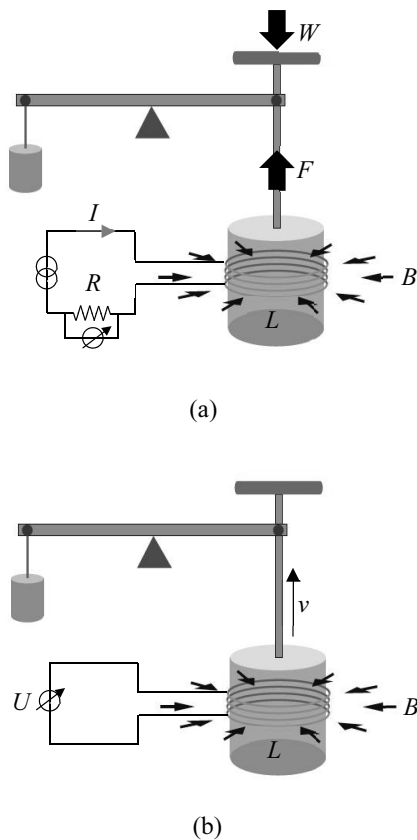


図8 キップルバランス法概念図 (a) 静的モード、(b) 動的モード

I (もしくはコイルの電圧と抵抗) を測定することにより、力 F の大きさを決定することができる。微小力領域では、質量の国家標準の相対不確かさが大きく、また、その質量標準の下限値に制限があることによって高精度な実荷重式力標準機を開発することが困難となっている。キップルバランス法を用いることにより電気標準へのトレーサビリティが可能となるため、微小力標準の確立に利用できる。一方、磁石の形状や釣合い機構等の構造上の問題で、均一な磁場を形成することやコイルの軸方向の一定速度運動が困難であるという課題もある。

電磁力平衡式は、図9に示すような質量計測用の電子天びんを利用することが多い。この手法では、質量標準にトレーサブルな分銅により校正を行っている。すなわち磁石の周囲のコイルに流れる電流を調整することで荷重を釣り合わせ、その時に測定したコイルの電流値から荷重を算出する。市販の電子天びんでは、ひょう量 6.1 g に対して最小分解能は 0.1 μg (約 1 nN) という製品もある。電子天びんは、直線性、再現性並びに精度が良いため、力計の校正において参照標準とすることができる。一方、後述するように、校正中の、電子天びんと被校正力計間に作用している力を正確に両方に伝達するための伝達機構の開発が課題として挙げられる。

3.1.3 静電力平衡式

図10に示すように、静電力平衡式は、対向する二つの電極間に働く静電力 F を利用し、加えた荷重 W と釣り合わせる手法であり、ボルトバランス法もしくは電圧天びんとも呼ばれている。対向する二つの電極の形状は特に制限されていないが、二重同軸円筒や平行平板の構造がよく用いられている。静電力 F は電位差と静電容

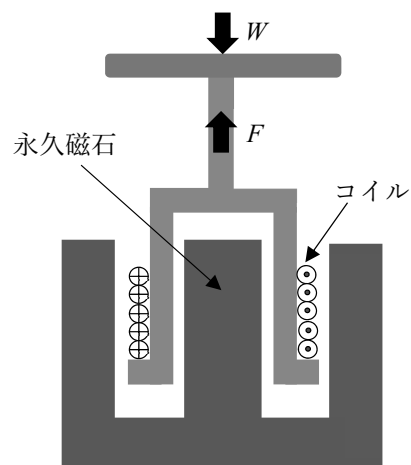


図9 電磁力式概念図

量に関係し、次の式で表される。

$$W = F = \frac{1}{2} \frac{dC}{dz} U^2 \quad (3)$$

ここで W は荷重、 F は静電力、 dC/dz は静電容量勾配、 U は電位差である。この原理を用い、ボルトバランス法では以下の2つのモードを通じて負荷した荷重 W を測定する。まずは静電容量勾配測定モードで静電容量勾配を測定する。次にひょう量モードで電極間の電圧 U を制御し、静電力 F を発生させて荷重 W と釣り合わせ、荷重 W を測定する。この手法では、分銅による校正ではなく、静電容量勾配をあらかじめ求めておくことによって、電圧の制御で安定的な微小力を発生させることができる。しかしながら4章で述べるように、事前に精密に静電容量勾配を測定するには高度な技術が必要である。

3.1.4 放射圧式

以上のほかに、微小力の発生（実現）には、光放射圧や音響放射圧の放射圧を利用することができる。Shawらは、光放射の原理に基づき、レーザーパワーを利用し、ナニュートン（nN）レベルの力を発生させ精密に評価した³⁹⁾。Melcherらは同様の技術を用いてフェムトニュートンレベルの力を発生させ、開発した力センサを自己校正できるようにした⁴⁰⁾。星は、単独では微弱な超音波振動子を数百個使用し、ミリニュートンレベルの非接触作用力を発生する小型超音波集束装置を開発した⁴¹⁾。しかし、これらの放射圧を利用した手法で発生した力は元々微弱で安定性が低いため、微小力の標準に用いる場合には、その精度及び安定性を向上させることが課題となっている。

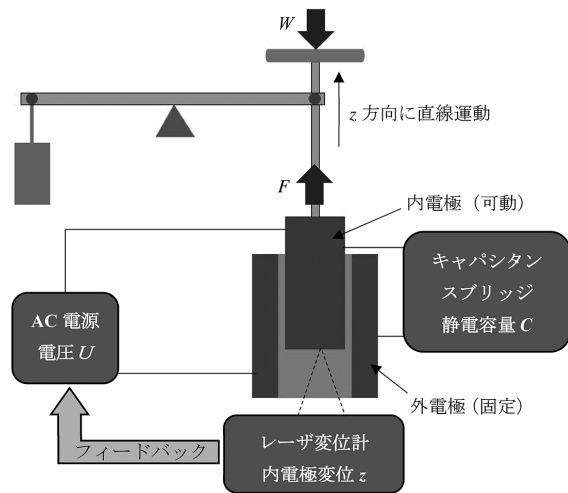


図10 ボルトバランス法概念図

3.2 微小力計測技術

微小力の標準の供給体制を確立するためには、精密な力の発生（実現）技術だけでなく、それを精密に計測できる微小力計測技術が重要となる。すなわち高精度、高安定かつ線形性の良い微小力変換器の開発が必要である。力変換器は、力の大きさを他の物理量に変換するものであり、ひずみゲージ式をはじめ、音叉共振式、静電容量式、弦振動式、電磁力（フォースコイルバランス）式等の原理が利用されている。なお、「力計」は、力変換器（センシング部）、ケーブル、指示計器を組み合わせた完全な機器として定義される⁴²⁾。力変換器単体では力計とは呼ばない。ここでは微小力計測に利用できる可能性のある主な計測技術を紹介する。

なお力計には、力による変位をダイヤルゲージで読み取る環状ばね型力計、力による容積変化を水銀の漏れ量により読み取る容積型力計もあるが、いずれも微小力計測には不向きのためここでは割愛する。

3.2.1 ひずみゲージ式

ひずみゲージ式力変換器は力計測分野において極めて多く利用されており、その用途、構造並びに性能に関して様々な報告がある^{43),44)}。図11に示すように、ひずみゲージは抵抗線、ゲージリード、ゲージベースにより構成されている。ひずみゲージ式力変換器は負荷が加わる部分である弾性体に貼付けられた抵抗線の抵抗変化を利用する。力がかかるとこの弾性体がわずかに変形し、計測点に貼付された抵抗線も変形しその抵抗値が変化する。図12に力変換器によく用いられるホイートストンブリッジ回路を示す。この回路では、ひずみに比例して電気抵抗が変化する4枚のひずみゲージが使われ、ブリッジに印加された電圧 e_i に比例し、かつひずみに比例した非常に小さい電圧信号 e_o が出力される。この出力信号を増幅器により増幅して指示計器で指示する。ひずみゲージ式力変換器は直線性、応答性、並びに安定性も優れている。一方、微小力の測定には、軟質の弾性体が必要で、これは繰り返しの安定した変形に向かないため、ひずみゲージ式では高安定な力変換器を製作するのに限界がある。また、一般的な力レベルでのひずみゲージ式力変換器の定格出力（1 mV/V ~ 3 mV/V）に比べ、ミリニュートンレベル及びそれ以下の定格容量の力計では定格出力がかなり小さくなってしまふ（分解能不足）。現在、市販のひずみゲージ式力変換器では、最小定格容量は50 mNとなっている。

金属抵抗式ひずみゲージを用いた力変換器による微小力計測には分解能や再現性の限界が見られる一方、半導体のピエゾ抵抗効果を利用した、ピエゾ抵抗式ひずみ

ゲージを用いた力変換器も普及している。ピエゾ抵抗式ひずみゲージのひずみによる抵抗変化率は金属材料を使用したゲージの数十倍に達するのが特徴である。このため、ひずみ測定系を簡素化できるが、一方でピエゾ抵抗式ひずみゲージには温度依存性が大きい、ひずみによる抵抗変化の非線形性が強いなどの難点がある⁴⁵⁾。マイクロ電子機械システム (MEMS) 分野において、ピエゾ抵抗式ひずみゲージを利用した力変換器の開発が拡大しつつある。微小力計測分野では、この原理に基づいた高感度でかつ良い直線性を有する力変換器が開発されている^{46)~49)}。Peinerらはピエゾ抵抗式ひずみゲージをマイクロカンチレバーに実装し、直線性の良い、600 μNまでの微小力を計測する微小力変換器を開発した⁴⁹⁾。これらのピエゾ抵抗式微小力変換器はマイクロニュートンレベルからミリニュートンレベルの力計測に利用できるが、この範囲での利用可能な(上手く負荷できる)力の標準がないため、電子天びんを参照標準として校正されている。より高精度な微小力計測を可能にするために

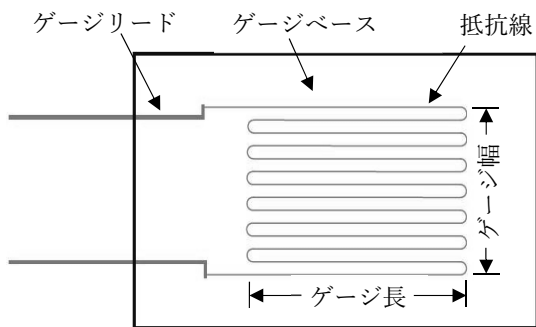


図 11 力変換器に用いる汎用ひずみゲージの形状

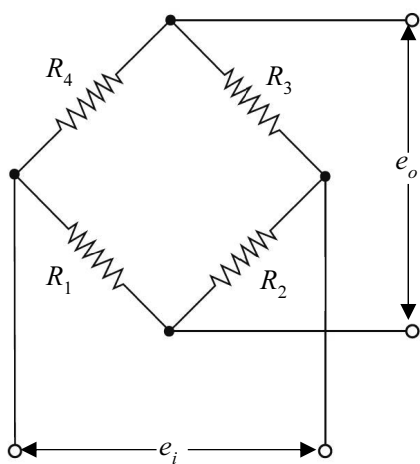


図 12 ホイートストンブリッジ回路

は、温度依存性を克服する必要がある。

3.2.2 振動式

ある一定周波数で励磁加振している弦状の振動子に荷重を加えると、共振周波数が変化する。この現象を力の検出に利用したものが振動式力変換器である。図 13 (a) にその原理を示す。共振角振動数 ω と張力 F との関係は次の式で表される。

$$\omega = \frac{\pi}{l} \sqrt{\frac{F}{\tau}} \quad (4)$$

ここで、 l は弦の長さ、 τ は弦の単位長さ当たりの質量である。弦振動式の力計はわずかな変位で、高分解能で微小力を計測できる特徴がある。力計の高精度化及び高応答速度化が容易である。一方、非直線性が強く、外部振動の影響を受けやすいという難点もある。Stalderらは、直径 5 μm、長さ 4 mm の炭素繊維を振動弦として使用し、25 μN に対して分解能 2.5 nN の力の計測を実現している⁵⁰⁾。

図 13 (b) に音叉共振式の力変換器を示す。2つの弦を複合した構造の振動式となっている。音叉の共振周波数が張力の関数となり、加える力が変わると、共振周波数が変わる。福澤らは双音叉型共振器を用いた高精度隙間制御が可能な高感度力センサを開発し、微小力の検出限界としては 19.6 μN を達成している⁵¹⁾。音叉共振式は弾性変形に依存せず微小力計測に有利である。音叉共振式はひずみゲージ式よりひずみが非常に小さいが、出力感度は数十倍にあたり、分解能・安定性・再現性などが優れている。この手法は電子天びんにも採用されている⁵²⁾。市販の音叉共振式電子天びんでは、ひょう量 220 g に対して最小分解能は 0.1 mg (約 1 μN) に達している。NMIJ では、音叉共振式の力計を参照標準とした力比較器を開発し、定格容量 50 N 以下の力計に対する校正を試みている^{53), 54)}。今後さらに微小力領域での音叉

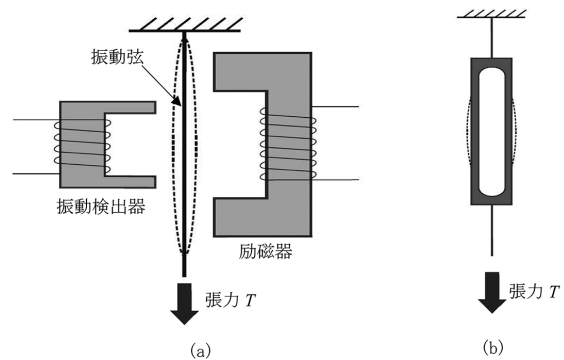


図 13 振動式力変換器の原理
(a) 振動弦, (b) 音叉共振式振動子

共振式力計並びに力比較器の開発が期待される。

3.2.3 静電容量式

静電容量式力変換器の原理・構造を図14に示す。平行平板のコンデンサの静電容量 C と電極間のギャップ d との関係は次の式で表される。

$$C = \epsilon \cdot \frac{S}{d} \quad (5)$$

ここで、 S は重ねている電極の面積、 ϵ は誘電率である。この手法では、荷重の大きさを、弾性体の変位により生じたコンデンサの静電容量の変化から計測する。この方式の力変換器では、弾性体の形状の制限がないため、力計のサイズを小さくできる利点がある。一方、静電容量は電極間の誘電率によって変化するため、外部の環境に影響されやすい問題がある。従来の静電容量式の力変換器は大きな力の計測に用いられていたが、市販されているものの中には微小力変換器もあり、中には定格容量 50 mN で分解能 10 μ N という性能のものもある。

近年では、MEMS 技術の飛躍的な進歩により、静電容量式の MEMS 微小力センサが開発されるようになってきている。Sun らは MEMS 技術を用い、静電容量式の原理に基づき、計測レンジ 490 μ N (分解能 0.01 μ N) と計測レンジ 900 μ N (分解能 0.24 μ N) の 2 軸計測できる力変換器 (微小力センサ) を開発した⁵⁵⁾。この微小力センサ (指示装置を含め) は高分解能を達成することができたが、非直線性に改善の余地がある。Wong らも MEMS 技術を利用し、4.5 mm \times 4.5 mm の範囲に 5 \times 5 の行列で 25 基の静電容量式微小力センサを製作し、2.5 N までの力を計測している⁵⁶⁾。このタイプの微小力センサは低荷重でも感度が高いと報告されている。個々の微小力センサの定格容量はおおむね 0.1 N とみなせるが、分解能については言及されていない。

3.2.4 電磁式 (フォースコイルバランス)

上記で紹介した微小力計測技術のほか、微小力発生技術で紹介した電磁式を用いることもある。これは

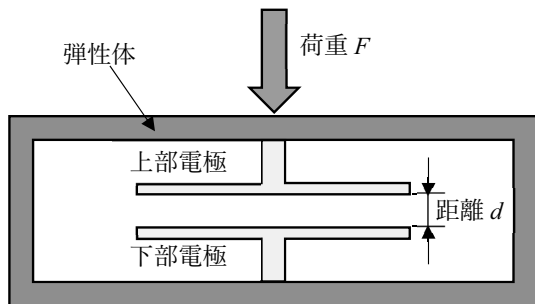


図14 静電容量式力変換器の原理

フォースコイルバランス式センサともいう。磁石とコイルを組み合わせるにより発生した電磁力でもって、負荷された既知の力と釣り合わせる。この時、コイルに流れている電流値を測定し、力を測定する。この手法は、安定性が良い、精度が高い等の利点があるが、装置が大型になるという難点もある。

4. 各国家計量標準機関 (NMI) における微小力標準への取組み

各 NMI は、様々な微小力の発生技術を用い、微小力標準の確立に取組んでいる。微小力標準を確立するには、高精度かつ長期安定性を有する微小力発生技術が必要であるため、第3章で紹介した実荷重式、電磁力式並びに静電力式が有望であると考えられる。ここでは、各微小力の発生技術に基づいた各国 NMI における微小力標準機 (発生機構・装置) の研究開発状況、力の範囲及びその不確かさをまとめたので紹介する。

各国 NMI が発表した雑誌論文や学会講演資料に基づき、図15にそれぞれの微小力発生技術と発生できる力の範囲をまとめてみた。また、報告された各微小力標準機 (発生機構・装置) の不確かさの評価結果を比較するため、それぞれを相対標準不確かさに統一して計算し直した。結果を図16に示す。詳細は各節において説明する。

4.1 実荷重式力標準機

実荷重式は、原理が簡単でありかつ既存の力標準体系に整合性があるため、各 NMI により積極的に開発されている。韓国の NMI である韓国標準科学研究院 (KRISS)

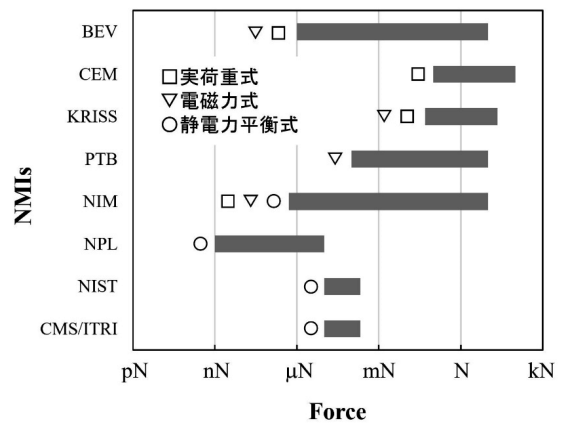


図15 各 NMI における研究開発されている微小力標準の範囲及びその発生技術

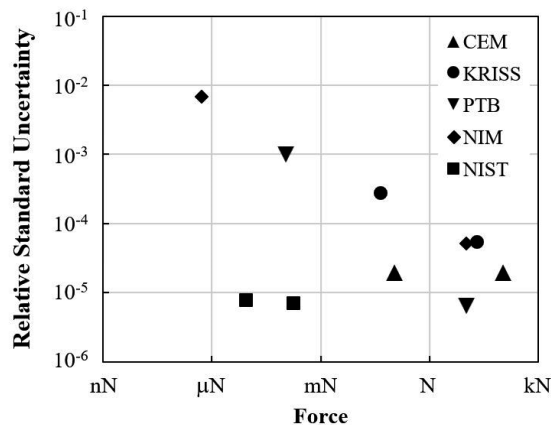


図 16 各 NMI が開発した微小力標準機（発生機構・装置）の相対標準不確かさ

が開発した実荷重式力標準機は、ナイフエッジを支点とした釣合い機構を用いており、0.5 N から 22 N までのレンジの力の発生を実現している⁵⁷⁾。その力標準機の相対拡張不確かさは 1.0×10^{-4} （包含係数 $k=2$ ）と評価されている。スペインの NMI である CEM が開発した実荷重式力標準機は、薄い金属シート（弾性ヒンジ）を支点とした釣合い機構を採用しており、0.1 N から 100 N までのレンジの力の発生を実現している⁵⁸⁾。その相対標準不確かさは 2.0×10^{-5} と評価されている。中国の NMI である中国計量科学研究院（NIM）が開発した実荷重式力標準機は、エアベアリングを支点とした釣合い機構を導入し、1 mN から 10 N までのレンジの力の発生を実現している^{59), 60)}。その力標準機の相対拡張不確かさは、1 mN から 0.5 N までのレンジで 1.0×10^{-4} （ $k=2$ ）、0.5 N から 10 N までのレンジで 5.0×10^{-5} （ $k=2$ ）と評価されている。また、3.1.1 項で述べた、重錘のサイズや重錘加除機構における課題を解決するため、重錘の材料として、比重の低いチタンを使用している。これによりミリニュートンレベルにおけるおもりでも加工が容易にできる程度の体積を確保している。

4.2 電磁式力標準機

電磁式は、キップルバランス法と電磁力平衡式の 2 手法があるが、元々キップルバランス法はプランク定数の精密測定のために開発されたものであり、力標準機としては、電磁力平衡式を利用した力比較器の開発例が多い。図 17 に示すような構成で、電子天びんを参照標準とし、力計を校正できるようにしている。ドイツの NMI であるドイツ物理工学研究所（PTB）が開発した力比較器は、ひょう量の異なる複数の電子天びんを参照

標準として用いており、100 μN から 10 N までのレンジの力を校正できている⁶¹⁾⁻⁶⁴⁾。その相対標準不確かさは標準偏差は 6.5×10^{-6} から 1.0×10^{-3} と見積られている。KRISS が開発した力比較器は、50 mN から 5 N までのレンジの力を校正できている⁶⁵⁾。その相対拡張不確かさは最大 5.0×10^{-5} （ $k=2$ ）と評価されている。NIM が開発した力比較器は、500 nN から 500 μN までのレンジの力を校正できている^{16), 66)}。その相対標準不確かさは最大 6.5×10^{-3} と評価されている。また、オーストリアの NMI である BEV が開発した力標準機は実荷重式並びに電磁力平衡式の両方の技術を取り入れている。まず 10 μN から 10 N までのレンジの力をおもりに作用する重力により発生し、1 μN から 10 μN までのレンジの力を電子天びんを参照して実現することにより、広範囲の力標準を実現している⁶⁷⁾。しかし、その不確かさは未報告である。

4.3 静電力平衡式力標準機

静電力平衡式は、元々荷電粒子間の相互作用なので微弱な力の釣り合いであり、微小質量標準の研究開発に利用されてきている。NPL は、静電容量平衡式の原理に基づき、4 枚の平衡電極の間に 1 枚の移動電極を挟んでキャパシタを構成し、1 nN から 10 μN までの力を発生できる電圧天秤を開発している⁶⁸⁾。米国の NMI である米国標準技術研究所（NIST）⁶⁹⁾⁻⁷¹⁾ は、静電容量平衡式の電圧天びんを開発し、10 μN から 200 μN までの力を発生させ、1 mg と 20 mg の分銅の質量を評価し、分量法による評価結果と同程度又はより小さい不確かさを得たとしている。その相対標準不確かさは 1 mg（10 μN）で 7.3×10^{-6} 、20 mg（200 μN）で 6.5×10^{-6} と評価されて

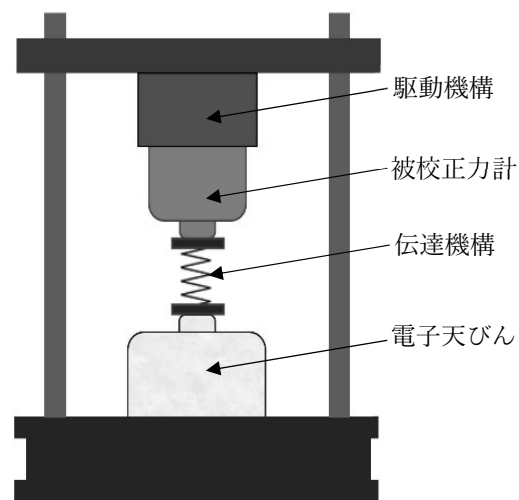


図 17 電子天びんを参照標準とした力比較器の模式図

いる。台湾のNMIであるCMS/ITRIは、平行平板構造の電極を採用して200 μN までの力を発生できる微小力発生機構を開発し、1 mg, 2 mg, 5 mg 及び10 mg の分銅の質量評価を試みている^{72), 73)}。その相対標準不確かさは200 μN に対し、数 nN であると報告されている。NIMはNISTと同様に、二重同軸円筒構造の電極を採用し、10 μN から100 μN までのレンジの力の発生できる微小力標準機を開発した⁷⁴⁾。その相対標準不確かさは最大 1.0×10^{-3} と評価されている。

しかし、3.1.3項で述べたように、静電力平衡式では静電容量勾配を精密に測定することが困難である。電極の移動には高度の直線性が要求されるため、先行研究で開発された電圧天びんは、高精度の直動機構や変位計測装置を採用した大型装置となる傾向がある。この問題を解決するため、NISTでは多項式を用いて静電容量勾配モードでの測定結果を検討している⁷⁵⁾。KRISSEでは、零位法に使用するバランス機構の並列性の誤差分析と微小力の補償に関する研究を進めている⁷⁶⁾。

4.4 微小力標準機の力の範囲と不確かさ

図16から、発生する力が小さくなると、相対標準不確かさが大きくなるのがわかる。ミリニュートン、マイクロニュートンの領域では、不確かさは 10^{-3} オーダーになっている。一方で、微小力に関する研究開発では、NISTが開発した電圧天秤の不確かさが著しく小さいこともわかる。

国際度量衡局(BIPM)のウェブサイトにも各NMIの校正・測定能力(Calibration and Measurement Capability: 以下CMCと称す)が掲載されている⁷⁷⁾が、これら研究開発中の微小力標準の範囲ではCMC Tableへの登録は皆無の状況である。このことから微小力標準の確立が容易でないことが推察される。CMCの表明のためには、微小力の発生装置のみならず、微小力を計測するための高精度力計も必要となる。現状ではそのような要求を満たす高精度力計の開発は進んでおらず、CMC登録が進んでいない大きな要因の一つとなっている。一方、NMI間での微小力発生装置の能力同等性を評価するために、KRISSE, PTB, NIST, NPLの4者において、伸介器としてナニュートンレベルの力を計測できるマイクロカチレバーを利用した国際比較が実施されたことは大変興味深い試みである⁷⁸⁾。

5. 今後の研究展開

微小力標準のトレーサビリティ実現には、微小力標準

のみならず、①微小力を発生させる標準器、②計測する伸介器、そして③校正技術の三要素の確立が必要である。微小力を発生させる標準機とは、基準となる精密な微小力を発生させる装置であり、基本単位の標準にトレーサブルな原理により実現されるものである。微小力を計測する伸介器とは、いわゆる力計であり、微小力を検知し電気信号に変換する装置であり、それらの分解能や感度の安定性が求められる。この二つの装置・機器が完成した上で、校正技術の開発が必要となる。校正技術とは、標準器から伸介器に、そして伸介器から下階層の微小力発生装置又は試験機等に、正確に微小力を伝達する技術であり、不要な寄生分力を混入させない工夫が必要である。

上記の状況を踏まえ、著者らは、現状産総研で供給できていない10 N未満の力標準を実現するため、重力並びに電磁力を利用した微小力標準機を早期に開発する。100 mN ~ 10 N程度の範囲では、図7(b)に示すような実荷重式微小力標準機を開発する。不確かさを向上するためには、負荷枠の自重を打消すための釣合い機構にエアベアリング等の高感度を実現できる支点構造を用いる。さらに様々な支点構造並びに力点構造の違いが力標準機の感度特性に及ぼす影響を検討する。100 μN ~ 1 N程度の範囲では、図17に示すような、電子天びんを参照標準とした力比較器を開発する。3.1.2項で述べたように、校正中の、電子天びんと被校正力計間に作用している力を正確に伝達する(できる限り不要な寄生分力を混入させない)ための伝達機構を開発する。また、微小力に対しては、弾性体の変形量を測定する従来方式では不安定なため、微小力の計測技術の一つの振動式を利用し、より安定な微小力計をミリニュートンレベルの領域で開発する。将来的には、静電力平衡式の小型かつ高分解能な力計をミリニュートン、マイクロニュートンの領域で開発する計画である。

さらに、従来技術では限定した(鉛直下方)方向でのみ力計の校正が行われてきたが、計測器が使用される実使用状態での校正を実現するため、異なる任意方向の力を入力できる校正装置・校正技術を早期に開発し、標準機、計測器、校正手法の三要素を考慮した三位一体の微小力標準供給体制を確立する。中長期的には、微小力標準をさらに高度化し、また信頼性ある校正技術を開発し、産業界への標準供給の安定化に結びつける。

6. まとめ

本調査研究を通じて、産業界における微小力標準・計

測の需要を探り、また微小力の発生技術・計測技術を調べ、さらに各国家計量標準機関（NMI）における微小力標準に関する取組みをまとめることができた。微小力計測の需要調査を通じて、産業界における微小力の標準への関心が高く、その標準整備が期待されていることが分かった。産業界の需要に応じて、ミリニュートンレベルからの微小力標準に関する研究開発に着手することが急務である。また、微小力の発生技術・計測技術に関する調査及び考察を行った結果、実荷重式、電磁力式、静電力平衡式等の微小力の発生技術は微小力標準の設定に、ひずみゲージ式、振動式、静電容量式等の計測技術は仲介器に適する微小力計開発に応用できると想起するに至った。さらに、各NMIにおける微小力標準への取組みを調査し、微小力標準に関する研究開発状況の知見を得ることができた。今回の調査研究で得た情報を活かし、今後の微小力標準開発研究を推進できるように努めたい。

謝辞

本調査研究を行うにあたり、ご指導・ご助言を頂いた力トルク標準研究グループの大串浩司研究グループ長、林敏行主任研究員を初めとして、多くの皆様に深く御礼申し上げます。特に、微小力計測の課題調査にご協力をいただいたNMIJの強度振動標準研究グループの服部浩一郎研究グループ長、ナノスケール標準研究グループの平井亜紀子研究グループ長並びに木津良祐研究員、さらにアンケート、聞き取り調査等にご協力いただいた産業界の皆様に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 林敏行：微小力計測における技術課題，計量研究所報告. 50-1 (2001) 95-105.
- 2) 大岩彰：日本における国家計量標準とその供給体制：質量及びその関連量－力学量，計測と制御 =Journal of the Society of Instrument and Control Engineers 48-4 (2009) 313-320.
- 3) M. Tanimoto, F. Arai, T. Fukuda, H. Iwata, K. Itoigawa, Y. Gotoh, M. Hashimoto and M. Negoro: Micro Force Sensor for Intravascular Neurosurgery and in Vivo Experiment, Proceedings MEMS 98. IEEE. Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (1998) 504-509.
- 4) T. Washio and K. Chinzei: Needle Force Sensor, Robust and Sensitive Detection of The Instant of Needle Puncture, C. Barillot, D.R. Haynor, and P. Hellier (Eds.): MICCAI 2004, LNCS 3217 (2004) 113-120.
- 5) Z. Sun, M. Balicki, J. Kang, J. Handa, R. Taylor and I. Iordachita: Development and Preliminary Data of Novel Integrated Optical Micro-Force Sensing Tools for Retinal Microsurgery, In Robotics and Automation, 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2009), (2009) 1897-1902.
- 6) M. C. Yip, S. G. Yuen and R. D. Howe: A Robust Uniaxial Force Sensor for Minimally Invasive Surgery, IEEE transactions on biomedical engineering 57-5 (2010) 1008-1011.
- 7) 厚生労働省：薬局方，<http://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-11120000-Iyakushokuhinkyoku/JP17.pdf>. (2016).
- 8) 中尾政之，石井和久，佐藤知正，畑村洋太郎：離脱機構を有する非把持形マイクロ・ハンドリング工具の試み，日本機械学会論文集 C 編 61-583 (1995) 1021-1026.
- 9) 宮崎英樹，笠谷岳士，古谷野宏一，佐藤知正：微小物体に働く付着力，日本機械学会論文集 C 編 64-620 (1998) 1250-1257.
- 10) G. M. Pharr and W. D. Oliver: Measurement of Thin Film Mechanical Properties Using Nanoindentation, MRS Bulletin 17-7(1992) 28-33.
- 11) X. D. Li and B. Bhushan: A Review of Nanoindentation Continuous Stiffness Measurement Technique and Its Applications, Materials characterization 48-1 (2002) 11-36.
- 12) 宮原健介，松岡三郎，長島伸夫，三島周三：原子間力顕微鏡を基にした超微小硬さ試験機の開発，日本機械学会論文集 A 編 61-590 (1995) 2321-2328.
- 13) K. Miyahara, S. Matsuoka and N. Nagashima: Nanoindentation Measurement for a Tungsten (001) Single Crystal, JSME International Journal Series A Solid Mechanics and Material Engineering 41-4 (1998) 562-568.
- 14) S. Smith and L. Howard: A Precision, Low-Force Balance and Its Application to Atomic Force Microscope Probe Calibration, Rev. Sci. Instrum. 65-4 (1994) 903-909.
- 15) G. Shaw, J. Kramar and J. Pratt: Experimental Mechanics. SI-traceable Spring Constant Calibration of Microfabricated Cantilevers for Small Force Measure-

- ment, *Experimental mechanics* 47-1 (2007) 143-151.
- 16) K. H. Chung, G. A. Shaw and J. R. Pratt: Accurate Pico-scale Forces for In situ Calibration of AFM, *Proc. XIX IMEKO World Cong.* (2009) 402-405.
 - 17) G. Hu, J. L. Jiang, Z. M. Zhang, Y. Zhang, U. Brand and M.-S. Kim: Investigation of A Small Force Standard with the Mass Based Method, *ACTA IMEKO* 6-2 (2017) 13-20.
 - 18) JIS B. 7721-2018 引張試験機・圧縮試験機—力計測系の校正方法及び検証方法, 日本規格協会 (2018).
 - 19) J. P. Cleveland, S. Manne, D. Bocek, P. K. Hansma: A Nondestructive Method for Determining the Spring Constant of Cantilever for Scanning Force Microscopy, *Rev. Sci. Instrum.* 64-2 (1993) 403-405.
 - 20) J. E. Sader, I. Larson, P. Mulvaney and L. R. White: Method for the calibration of atomic force microscope cantilevers, *Rev. Sci. Instrum.* 66-7(1995) 3789-3798.
 - 21) J. E. Sader: Frequency Response of Cantilever Beams Immersed in Viscous Fluids with Applications to the Atomic Force Microscope, *J. Appl. Phys.* 84-1 (1998) 64-76.
 - 22) J. E. Sader, J. W. M. Chon and P. Mulvaney: Calibration of Rectangular Atomic Force Microscope Cantilevers, *Rev. Sci. Instrum.* 70-10 (1999) 3967-3969.
 - 23) Ishijima, T. Doi, K. Sakurada and T. Yanagida: Subpiconewton Force Fluctuations of Actomyosin in Vitro, *Nature* 352 (1991) 301-306.
 - 24) J. L. Hutter and J. Bechhoefer: Calibration of atomic-force microscope tips, *Rev. Sci. Instrum.* 64-7 (1993) 1868-1873.
 - 25) A. Ishijima, H. Kojima, H. Higuchi, Y. Harada, T. Funatsu and T. Yanagida: Multiple-And Single-Molecule Analysis of the Actomyosin Motor by Nanometer-Piconewton Manipulation with a Microneedle: Unitary Steps and Forces, *Biophys. J.* 70-1 (1996) 383-400.
 - 26) M. Tokunaga, T. Aoki, M. Hiroshima, K. Kitamura and T. Yanagida: Subpiconewton Intermolecular Force Microscopy, *Biochem. Biophys. Res. Comm.* 231-3 (1997) 566-569.
 - 27) OIML R111-1, Weights of Classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 and M3 (2004).
 - 28) B. P. Kibble: A Measurement of the Gyromagnetic Ratio of The Proton by the Strong Field Method, *Atomic Masses and Fundamental Constants* 5 (1976) 545-551.
 - 29) B. P. Kibble, I. A. Robinson and J. H. Belliss: A Realization of the SI Watt by the NPL Moving-Coil Balance, *Metrologia* 27-4 (1990) 173-192.
 - 30) I. A. Robinson and B. P. Kibble: The NPL Moving-Coil Apparatus for Measuring Planck's Constant and Monitoring the Kilogram, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 46-2 (1997) 596-600.
 - 31) I. A. Robinson and B. P. Kibble: An Initial Measurement of Planck's Constant Using the NPL Mark II Watt Balance, *Metrologia* 44 (2007) 427-440.
 - 32) I. A. Robinson: Towards the Redefinition of the Kilogram: A Measurement of the Plank Constant Using the NPL Mark II Watt Balance, *Metrologia* 49 (2012) 113-156.
 - 33) A. Eichenberger, G. Genevès and P. Gournay: Determination of the Planck Constant by Means of a Watt Balance, *The European Physical Journal Special Topics.* 172 (2009) 363-383.
 - 34) A. Eichenberger, H. Baumann, B. Jeanneret, B. Jeckelmann, P. Richard and W. Beer: Determination of the Planck constant with the METAS watt balance, *Metrologia* 48 (2011) 133-141.
 - 35) H. baumann, A. Eichenberger, F. Cosandier, B. Jeckelmann, R. Clavel, D. Reber and Tommasini: Design of the New METAS Watt Balance Experiment Mark II, *Metrologia* 50 (2013) 235-242.
 - 36) C. A. Sanchez, B. M. Wood, R. G. Green, J. O. Liard and D. Lnglis: A Determination of Plank's Constant Using the NRC Watt Balance, *Metrologia* 51 (2014) S5-S14
 - 37) S. Schlamming, D. Haddad, F. Seifert, L. S. Chao, D. B. Newell, R. LIU, R. L. Steiner and J. R. Pratt: Determination of the Plank Constant Using a Watt Balance with a Superconducting Magnet System at the National Institute of Standards and Technology, *Metrologia* 51 (2014) S15-S24.
 - 38) D. M. Kim, B. C. Woo, K. C. Lee, K. B. Choi, J. A. Kim, J. W. Kim and J. H. Kim: *Metrologia.* 51 (2014) S96-S100.
 - 39) G. A. Shaw, J. Stirling, J. Kramar, P. Williams, M. Spidell and R. Mirin: Comparison of electrostatic and photon pressure force references at the nanonewton level, *Metrologia* 56 (2019) 025002, 1-9.
 - 40) J. Melcher, J. Stirling, F. G. Cervantes, J. R. Pratt and G. A. Shaw: A self-calibrating optomechanical force sensor with femtonewton resolution, *Appl. Phys. Lett.* 105-233109 (2014) 1-4.

- 41) 星貴之：非接触作用力を発生する小型超音波集束装置の開発, 計測自動制御学会論文集 50-7 (2014) 543-552.
- 42) JIS B. 7728-2013 一軸試験機の検証に使用する力計の校正方法, 日本規格協会 (2013).
- 43) 計量研究所・計量技術ハンドブック編集委員会：新版・計量技術ハンドブック (コロナ社, 1987).
- 44) 島田好昭：ひずみゲージを用いたセンサ, 計測と制御. 45-4 (2006) 329-334.
- 45) 渡辺理：ひずみゲージとその応用 (日刊工業新聞社, 1968) 127.
- 46) W. L. Jin and C. D. Mote, Jr: A six-component silicon micro force sensor, *Sensors and Actuators A* 65 (1998) 109-115.
- 47) D. V. Dao, T. Toriyama, J. Wells and S. Sugiyama: Silicon piezoresistive six-degree of freedom micro force-moment sensor, *Sens. Mater.* 15 (2002) 113-135.
- 48) J. H. Kim, J. I. Lee, H. J. Lee, Y. K. Park, M. S. Kim and D. I. Kang: Design of flexible tactile sensor based on three-component force and its fabrication, 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2005), (2005) 2578-2581.
- 49) E. Peiner, A. Tibrewala, R. Bandorf, S. Biehl, H. Lütthje and L. Doering, *Sensors and Actuators A* 130-131 (2006) 75-82.
- 50) A. Stalder and U. Dürig: Oscillating String as Force Sensor, *Rev. Sci. Instrum.* 66 (1995) 3576-3579.
- 51) 福澤健二, 安藤貴真, 柴本真実, 張賀東, 三矢保永：双音叉型共振器を用いた高精度隙間制御可能な高感度力センサ, 日本機械学会論文集 C 編 72 (2006) 125-131.
- 52) 渡部新一：質量：電子天びんの動向, 計測と制御 44-10 (2005) 668-674.
- 53) T. Hayashi, Y. Katase, K. Ueda, T. Hoshino, H. Suzawa and M. Kobayashi: Evaluation of Tuning Fork Type Force Transducer for Use as a Transfer Standard, *Measurement* 41-9 (2008) 941-949.
- 54) T. Hayashi, Y. Katase, K. Ueda, N. Shinozaki and H. Suzawa: Application of a Loading Frame Structure to a Force Comparator Reference to a Tuning-Fork-Type Force Transducer, *Proc. XIX IMEKO World Congress* (2009) 250-254.
- 55) Y. Sun, B. J. Nelson, D. P. Potasek and E. Enikov: A Bulk Microfabricated Multi-Axis Capacitive Cellular Force Sensor Using Transverse Comb Drives, *J. Micro-mech. Microeng.* 12 (2002) 832-840.
- 56) R. D. P. Wong, J. D. Posner and V. J. Santos: Flexible Microfluidic Normal Force Sensor Skin for Tactile Feedback, *Sensors and Actuators A* 179 (2012) 62-69.
- 57) Y. K. Park, H. K. Song, H.Y. Lee and M. S. Kim: Small-Capacity Deadweight Force Standard Machine Compensating Loading Frame, *Measurement* 45-1 (2012) 68-73.
- 58) N. Medina, J. D. L. Serna, J. A. Fernandez and R. M. Lorente: Development of a 0.1 N-100 N Force Standard Machine, *XIX IMEKO World Cong.* (2015).
- 59) G. Hu, J. L. Jiang, T. Li, Z. M. Zhang, H. L. Ji and L. J. Zhuang: A New 10n Deadweight Force Standard Machine, *IMEKO 23rd TC3, 13th TC5 and 4th TC22 International Conference* (2017).
- 60) G. Hu, J. L. Jiang, T. Li, Z. M. Zhang, H. L. Ji and L. J. Zhuang: A Small Force Standard Machine with Air Bearing Support, *Asia-Pacific Symposium on Measurement of Mass, Force and Torque (APMF 2017)* (2017)
- 61) S. Niehe: A New Force Measuring Facility for the Range of 10 mN to 10 N, *Proc. XVII IMEKO World Congress* (2003) 335-340.
- 62) J. Illemann and R. Kumme: Research for a National Force Standard Machine in the Range from Micro Newton to Newton Relying on Force Compensation, *Proc. XVIII IMEKO World Congress on Metrology for a Sustainable Development* (2006).
- 63) J. Illemann and R. Kumme: The Achievable Uncertainty for Balance-based Force Standard Machines in the Range from Micro Newton to Newton, *Proc. IMEKO TC3/TC16/TC22* (2007).
- 64) C. Schlegel, O. Slanina, G. Haucke and R. Kumme: Construction of a Standard Force Machine for the Range of 100 μ N-200 mN, *Measurement* 45 (2012) 2388-2392.
- 65) J. H. Kim, Y. K. Park, M. S. Kim, J. H. Choi, D. I. Kang: Development of Force Standard Machine in the Milli-Newton Range Based on Electromagnetically Compensated Balance, *Asia-Pacific Symposium on Measurement of Mass, Force and Torque (APMF 2015)* (2015) 4-7.
- 66) G. Hu, J. L. Jiang, Z. M. Zhang and Y. Zhang: A Traceable Small Force Standard Based on Electromagnetic Compensation Balance, *Asia-Pacific Symposium on Measurement of Mass, Force and Torque (APMF 2015)*

- (2015) 18-26.
- 67) C. Buchner: Determination of Micro Forces from 1 μ N up to 10 N Realized with a Full Automatically Dead Load Machine Developed by the BEV, Proc. XIX IMEKO World Congress (2009) 397-401.
- 68) R. K. Leach, S. Oldfield, S. A. Awan, J. Blackburn and J. M. Williams: Design of a Bi-directional Electrostatic Actuator for Realising Nanonewton to Micronewton Forces, NPL REPORT DEPC-EM 001 (2004).
- 69) J.R. Pratt and J.A. Kramar: SI Realization of Small Forces Using an Electrostatic Force Balance, Proc. XVIII IMEKO World Congress on Metrology for a Sustainable Development (2006).
- 70) G. A. Shaw, J. Stirling, J. A. Kramar, A. Moses, P. Abbott, R. Steiner, A. Koffman, J. R. Pratt and Z. J. Kubarych: Milligram Mass Metrology Using an Electrostatic Force Balance, Metrologia 53 (2016) A86-A94.
- 71) G. A. Shaw, J. Stirling, A. Moses and P. Abbott: Electrostatic Force Balance Method for Milligram Mass Metrology, Simposio de Metrologia (2016) 1-2.
- 72) S. J. Chen and S. S. Pan: A Force Measurement System Based on an Electrostatic Sensing and Actuating Technique for Calibrating Force in a Micronewton Range with a Resolution of Nanonewton Scale, Meas. Sci. Technol. 22-4 (2011) 045104.
- 73) S. J. Chen and S. S. Pan and Y. C. Lin: Comparison of Milligram Scale Deadweights to Electrostatic Forces, ACTA IMEKO. 3-3 (2014) 68-72.
- 74) J. L. Jiang, G. Hu and Z. M. Zhang: Realization of an SI Traceable Small Force of 10 to 100 MicroNewton Using an Electrostatic Measuring System, ACTA IMEKO 6-2 (2017) 4-7.
- 75) J. Stirling and G. A. Shaw: Realising traceable electrostatic forces despite non-linear balance motion, Meas. Sci. Technol. 28 (2017) 055033(7pp).
- 76) I. M. Choi, M. S. Kim, S. Y. Woo and S. H. Kim: Parallelism error analysis and compensation for micro-force measurement, Meas. Sci. Technol. 15 (2004) 237-243.
- 77) BIPM, <http://kcdb.bipm.org>
- 78) M. S. Kim, J. R. Pratt, U. Brand and C. W. Jones: Report on the First International Comparison of Small Force Facilities: A Pilot Study at the Micronewton Level, Metrologia 49 (2012) 70-81.