

動的力標準と計測技術に関する調査研究

長谷川暉*

(2024年1月30日受理)

A Survey on Dynamic Force Standards and Measuring Techniques

HASEGAWA Akira

Abstract

The dissemination of force standards in Japan is limited to static forces whose magnitude does not change over time. However, there is a growing need for a dynamic force whose magnitude varies with time in various industries, especially in the automotive, aerospace, steel, and infrastructure industries. Therefore, this paper explores the demand in industry for dynamic force standards and generation and measurement technologies. I summarize research on dynamic force measurement conducted by national metrology institutes in other countries. I will also promote research on dynamic force generation and measurement, utilizing the information and findings from this survey.

1. はじめに

高層ビル、橋梁、高速道路などの大型構造物の建築は、商業、物流などを促進させ、大きな経済効果をもたらす。構造物の安全性の確保、向上には、構造材料や機能性材料の力学的特性の理解や大型車両の走行などに因る構造物への負荷の評価技術の高度化が欠かせない。各種材料の力学特性評価の高度化や国際整合性は、高度な力の標準の開発や供給、トレーサビリティの確保、国際比較の上に成り立っている。国立研究開発法人産業技術総合研究所（産総研）に属する計量標準総合センター（National Metrology Institute of Japan; NMIJ）は、日本の国家計量標準機関（National Metrology Institute; NMI）である。NMIJでは、力の国家計量標準の開発、高度化、維持、供給、国際比較等を行っている。力とは、国際単位系（SI）ではその単位をニュートン（N）と定義され、質量、長さ、時間の基本単位で構成された組み立て量（ $1\text{ N} = 1\text{ kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$ ）である。

2023年3月時点では、NMIJは、質量、長さ、時間の国家標準にトレーサブルな力の標準供給を100 mNから

20 MNまでの範囲で実施している。また、日本国内の標準供給並びに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; JCSS）により実現している。日本国内における力のトレーサビリティ体系を図1に示す。NMIJが所有する力標準機は、質量、重力加速度、長さの国家標準にトレーサブルに校正されている。NMIJは、JCSSで登録された校正事業者（JCSS登録事業者）に対して、事業者が保有する力基準機や参照標準の力計に対する力標準機へのトレーサビリティを提供している。力基準機や参照標準の力計を用いて、民間企業をはじめとする一般ユーザーが保有する力計や新規開発された材料等の力学特性評価などに用いられる一軸試験機が校正される。JCSSにおける標準供給は規格により定められた手順に従い実行されている。力のJCSS登録事業者は、JIS B 7721¹⁾、JIS B 7728²⁾、ISO 376³⁾、ISO 7500-1⁴⁾、ASTM E4⁵⁾、ASTM E74⁶⁾のいずれかの規格に基づき校正を行っている⁷⁾。上記の規格は負荷する力を階段状に変化させ、各力の大きさにおける力のつり合いを利用した静的な力の校正手順を定めている（図2）。

一方で、自動車産業、航空産業、製鉄業、インフラ事

* 工学計測標準研究部門 カトルク標準研究グループ

業等を中心に、大きさが時間変化する動的な力の計測に対する産業ニーズもかねてより存在する⁸⁾⁻¹⁰⁾。未だに慣性力を参照する動的力の校正方法の国際標準は存在しないものの、海外のNMIを中心とした動的力の計測技術の開発¹⁰⁾や校正サービス^{11),12)}が実施されている。日本の中心産業である自動車産業をはじめとする製造業の国際競争力の強化と国際整合性の確保に、動的力の標準整備や計測技術の高度化は大きく貢献する。以上の状況を踏まえ、動的力の計測技術に対する産業界の需要や海外のNMIによる取り組みについて、文献調査に加え力の

標準供給分野に係る企業等からも聞き取り調査を実施した。第2章では、現在NMIJが所有している力標準機と主な力計について紹介する。第3章では、動的力計測に対して産業界が抱く需要について紹介する。第4章では、海外のNMIの動的力標準と計測技術に関する取り組みを紹介する。第5章では、NMIJがこれから取り組む動的力の発生及び計測技術について紹介する。

2. 日本国内の力標準機と主な力計

日本の力の国家標準はNMIJが所有する力標準機である(図1)。2023年3月時点において、NMIJでは、7台の実荷重式力標準機、1台のこうかん式(てこ式)力標準機、2台の油圧式力標準機を所有しており、100 mNから20 MNまでの範囲で力の国家標準を維持、供給している。力標準機やJCSS登録事業者が管理する力基準機は、精密機器かつ大型設備であり、校正施設に備え付けられているため、運搬し両装置を直接比較し校正を実施することはできない。そのため、力基準機を校正する際には、力計を介して、力標準機と力基準機を比較する。以上のように、力の標準供給には、力標準機と力計が不可欠である。本章では力標準機と主な力計について紹介する。

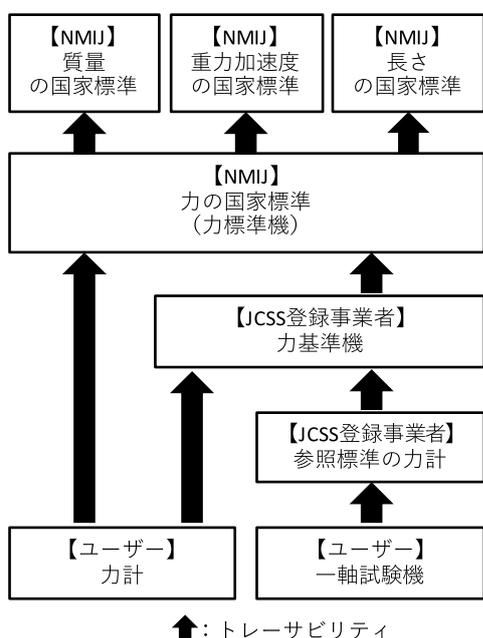


図1 力のトレーサビリティ体系図

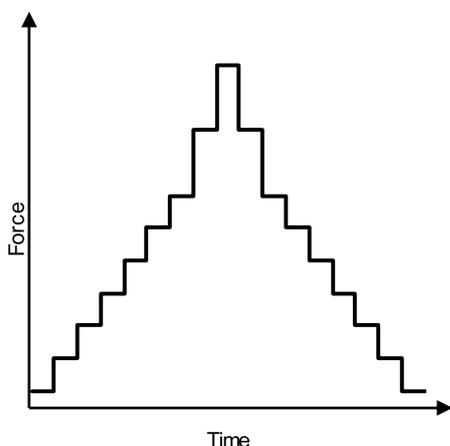


図2 力計校正時の負荷パターンの例

2.1 力標準機

日本の力の国家標準を実現する力標準機は、長期間の利用を想定した長寿命の装置として設計されており、力の発生原理として地表に存在する最も安定的な力である重力を利用している。NMIJが所有する力標準機は3種類に大別される。各力標準機が実現する力の校正範囲と校正測定能力(Calibration and Measurement Capability; CMC)を表1にまとめる。1つは、精密に質量調整された重錘を垂下し、その場に生じる重力加速度と重錘の質量との積に相当する重力を力変換器に負荷する装置であり、実荷重式力標準機と呼ばれる(図3)。NMIJでは、100 mNから500 kNまでの力を実荷重式力標準機により供給している。2つ目と3つ目の大きな力の発生装置では、重力を物理現象により増幅する。重錘に作用する重力を、てこの原理及びパスカルの原理を用いて拡大する装置は、それぞれ、こうかん式及び油圧式力標準機と呼称され、こうかん式は1 MN、油圧式は20 MNまでの力を実現している。

2.2 力計

力計とは、力を負荷される装置である力変換器と力変

表1 NMIJ が所有する各力標準機の力の校正範囲と校正測定能力

装置名	校正範囲	校正測定能力 (信頼の水準約 95%)
実荷重式力標準機	100 mN から 500 kN	100 mN から 200 mN : 1.0×10^{-2} 200 mN から 1 N : 5.0×10^{-3} 1 N から 500 kN : 2.0×10^{-5}
こうかん式力標準機	100 kN から 1 MN	1.0×10^{-4}
油圧式力標準機	100 kN から 20 MN	1.0×10^{-4}

換器から出力された信号を処理、表示出力する装置である指示器を組み合わせた装置を指す言葉である²⁾。多くの力変換器は、弾性体に力を加えた際に変化するひずみ量を検出し、信号に変換する構造を採用している。国内で最も多く流通している力計は、弾性体のひずみ量をひずみ（ストレイン）ゲージにより計測するひずみゲージ式ロードセルである。ひずみゲージ式ロードセルの概要を図4に示す。

弾性体の一端を固定端、もう一端を自由端とし、自由端側に荷重を加え、弾性体にたわみを生じさせる。すると、弾性体に貼り付けられたストレインゲージはそれぞれ伸び縮みし、変形量に応じた電気信号を出力する。発生した電気信号に対し、検出、増幅、変換及び処理など

を実行することで、力計は負荷されている力を計測値として表示する。

力変換器にはひずみゲージ式以外にも様々な形式のものが存在する。平行板として配置された電極を弾性体で囲い、静電容量の変化から電極間の距離を算出し弾性体のひずみ量に換算する静電容量式（図5a）、音叉振動子に引っ張り方向の力を加え、周波数の変化から力に換算する音叉式（図5b）、機械的応力を受けるとその大きさに比例して電荷を生成する圧電素子が分極した電荷量を電圧信号に変換する圧電式（図5c）、力による弾性体の変位をダイヤルゲージで読み取る環状ばね式、力による容積変化を水銀の流出量から読み取る容積式¹³⁾など、力変換器の構造は多岐に渡る。

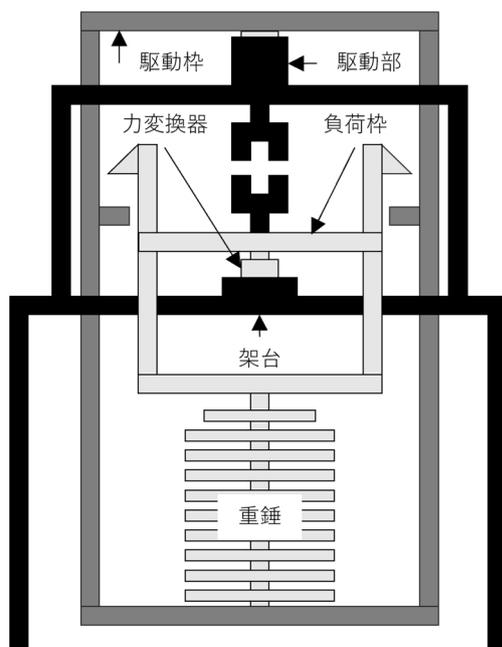


図3 実荷重式力標準機の模式図

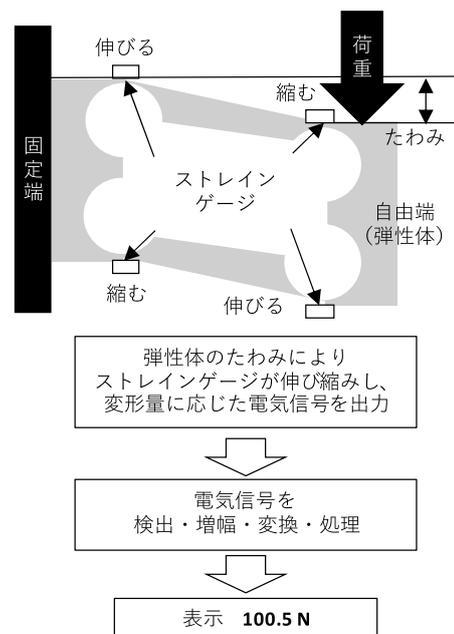


図4 ひずみゲージ式ロードセルの概要

3. 動的力計測に対して産業界が抱く需要

動的力標準と計測技術について、産業界のニーズ調査の結果を報告する。産業界で行われている動的力の主な用途を図6にまとめる。動的力計測の関連産業は自動車、製鉄、原子力、宇宙航空、鉄道、船舶など多岐に渡る¹⁴⁾。以下ではその具体的な用途を4つ紹介する。1) 自動車、携帯端末、放射性物質などの危険物質を管理、隔離するための容器をはじめとする、製品の安全性評価を目的とした疲労試験や衝突試験などの工学的探究は、18世紀ごろから非常に長い期間に渡り取り組まれ続け

ている¹⁵⁾。2) 宇宙船や宇宙構造物と宇宙塵との衝突から、宇宙塵のフラックス変化や粒子の大きさを計測するために衝撃計測装置が利用された例がある¹⁶⁾。3) 航空機、鉄道、船舶などの貨物や旅客を輸送する機体について、運転中に各部材にかかる力の時系列データを監視するプロセスモニタリング技術は、機体の寿命評価や機体の材料開発に資する情報収集のために求められている。4) トラックなどの大型車両が高速道路や橋梁などの巨大インフラ設備を走行する際の軸重量計測は、インフラの寿命評価や法令に基づく取り締まりの高度化のために重要である⁸⁾。

従来取り組まれてきた動的力計測に係る研究は、 10^2 N から 10^3 N オーダー程度の中荷重かつ 10^2 Hz オーダーから 2 kHz の周波数まで渡る周期的力と、100 kN を超える大荷重かつ 10^2 Hz から 10^3 Hz オーダー程度の周波数の衝撃力に大別される。本章では、それぞれの標準や計測技術と産業界との関連について報告する。

3.1 周期的力標準と計測技術に対する需要

機械や構造物の破壊事故の原因の約8割は疲労であると考えられている¹⁷⁾。科学技術や暮らしの安全を確保するために、疲労現象に関する工学的な研究は18世紀から取り組まれてきた¹⁵⁾。中でも、材料に応力 (Stress; S) を繰り返し、すなわち周期的に、加えた際に材料が破壊するまでの繰り返し回数 (Number of cycles; N) を調査する研究は現在でも広く取り組まれている。この際の S と N の関係を示した曲線は S - N 曲線と称されている。鉄鋼材料の S - N 曲線²¹⁾を図7に示す。本曲線は 10^5 回から 10^6 回程度の寿命域で折れ曲がり、繰り返し回数の軸

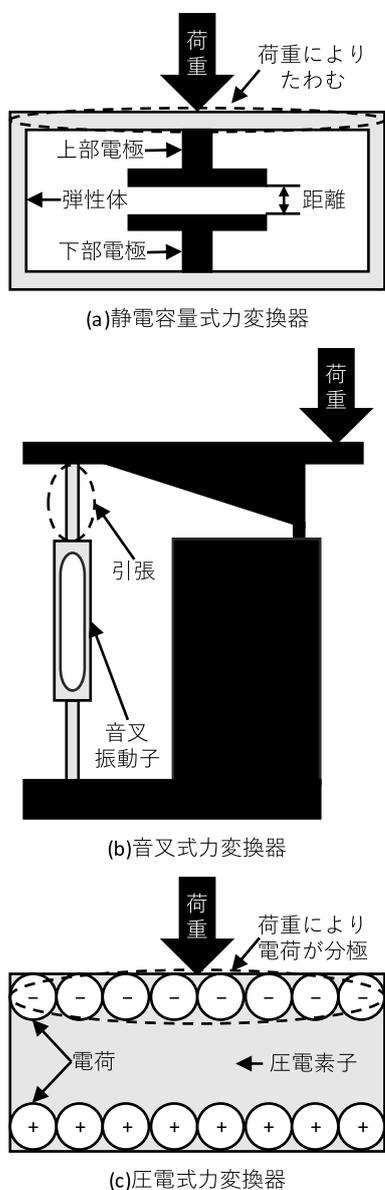


図5 様々な形式の力変換器

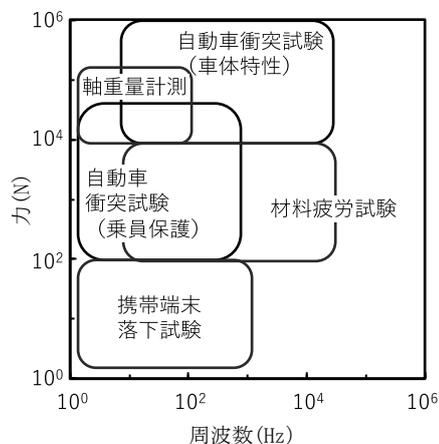


図6 産業界で使用される動的力の大きさと周波数

と平行になる。当時の機械や構造物の疲労設計は、この疲労限界を基準としたものが普及していた¹⁸⁾。近年では、材料の寿命域の拡大に伴い、繰返し回数が 10^7 回を超える超長寿命域における繰返し試験が注目を集めている。

日本国内では 10^9 回程度までの疲労試験が活発に取り組みられており^{19),20)}、中には 10^{11} 回もの疲労試験を実施した例も報告されている²¹⁾。繰返し回数の拡大がもたらした大きな成果の一例として、1980年代には、繰返し回数が 10^7 回程度の超長寿命域において、鉄鋼材料のS-N曲線が再び下降することが報告されている²²⁾。その後、他の鉄鋼材料でも同様の現象が複数報告され、これにより、従来の耐久設計を見直す必要性が指摘され始めている^{18),23)}。以上のように、疲労試験の繰返し回数の拡大は、我々の生活を支える基盤技術の安全性向上にとって重要である。試験の繰返し回数と時間と周波数との関係を図8に示す²⁴⁾。周波数50 Hzにおける 10^9 回

の繰返し試験には200日以上を要する^{18),19)}。仮に、繰返し回数が 10^{11} 回の試験を周波数50 Hzで実行すると約55年もの年月を要する計算となる。繰返し試験中の温度や湿度等の環境を維持するためには、試験に要する時間はなるべく短いことが望ましい。超音波疲労試験機を用いた試験において、一般的な周波数である20 kHz²⁵⁾を使用した場合、 10^9 回の繰返し負荷は約14時間で実現可能¹⁹⁾であり、 10^{11} 回の繰返し負荷は2か月程度で実施できる²¹⁾。以上のように、近年活発に取り組みられている高繰返し数の疲労試験の実現や効率化のためには、試験の高周波数化が不可欠である。

一方で、超音波疲労試験機を用いた疲労試験には、試験片が発熱する点や、局所的な塑性変形が繰返し速度に追従できないという問題点が指摘されてきた²⁶⁾。同様の問題点は試験中の応力計測にも存在する可能性がある。試験片の変形速度が力計の応答速度に近づいた際の力計の出力値の妥当性は、試験結果の信頼性に大きく影響するため、力変換器の周波数特性を理解することは、社会の安全に資する重要な研究課題である。

3.2 衝撃力標準と計測技術に対する需要

トラックなどの大型貨物車両による物資の運搬は、経済活動の基盤である。走行車両の重量は道路法²⁷⁾により定められており、その規定重量を超過する過積載車両の走行は、道路破損などの路面管理上の問題、騒音問題、振動問題などの公害や重大事故の原因となる^{8),28)}。走行車両が道路構造物の疲労に与える影響は、舗装の場合は4乗、鉄筋コンクリートを用いたRC (Reinforced Concrete) 床板の場合は12乗であるといわれている²⁹⁾。すなわち、軸重量が10 tと制限されているRC床板の路面上において、軸重量20 tの車両1台による走行が高速道路や橋梁などに与える負荷は、軸重量が規定内の車両約4000台分の走行に相当する。以上のような背景から、我が国では2023年4月1日より、高速道路等において自動軸重計を活用した指導取締りが開始された。従来の取締りの一例として、高速道路入口における取締りの模式図を図9に示す。一部高速道路入口付近において、走行車両の軸重を軸重計にて測定し、過積載が疑われた際には、近くに別途設置されたトラックスケールにて停止車両の重量測定を行い、その結果に応じた指導等をする。つまり、上述のような過積載車両の指導取締りが可能な高速道路入口は、トラックスケールが設置可能な場所に限定される。加えて、取締りの際には、違反の疑いがある車両を指定の位置に誘導する必要がある。時には物流の妨げとなる。現行の取締りにおいて、軸重計は過積載

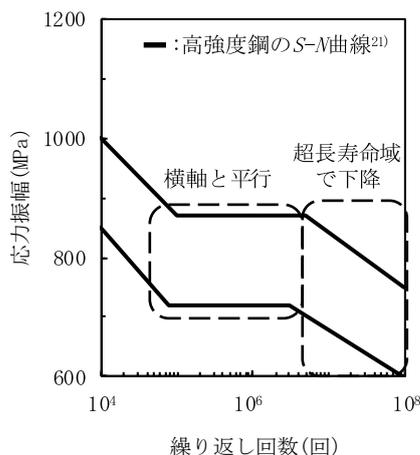


図7 鋼材のS-N曲線

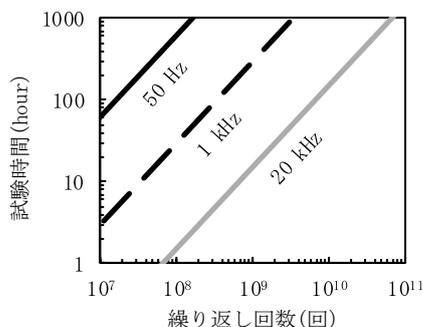


図8 試験の繰返し回数と時間と周波数の関係²⁴⁾

車両のスクリーニングとしての役割を担っており、一般に走行車両の軸重計測は走行速度が高いほど高度な技術が要求される^{8),28)}。また、トラックのすべての車輪を乗せる必要があるトラックスケールより、車軸ごとに測定可能な軸重計は小型である。軸重計の高度化により、高速車両に対する軸重計測が実用化されれば、従来の取締りよりも設置可能な場所が増え、物流の妨げにもなりにくい過積載車両の取締りへの実現が期待される。

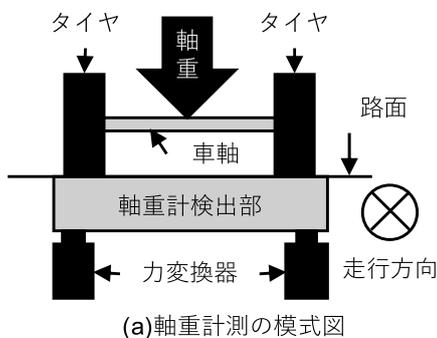
また、国際法定計量機関 OIML の勧告 R134-1³⁰⁾は、走行自動車及び軸荷重の自動はかりに関連するものである。フランス、スイス、チェコ、ブラジルなどの一部の国では、比較的低速な走行車両に対する取締りに導入されているものの、日本では未採用である。

図 10 に軸重計測の概要を示す。軸重計は軸重検出部と力変換器から構成されており、高速道路入口における取締り目的に設置される場合には、路面に埋め込むのが一般的である。軸重検出部上を走行車両が通過すると、タイヤを通じて軸重が力変換器に負荷されることで軸重計測を実施する (図 10a)。タイヤと路面の接触は点ではなく面であるため、軸重計上にタイヤが乗った時刻 A、軸重計に軸重がすべてかかる時刻 A'、軸重計から負荷が取り除かれ始める時刻 B'、軸重計とタイヤが離れる時刻 B は、それぞれ異なる (図 10b)。走行車両が軸重計を通過する前後の軸重計出力の例を図 10 (c) に示す。時刻 A から時刻 B まで軸重計に負荷が生じるものの、軸重計測に有効な出力は時刻 A' から時刻 B' までの時間に生じたものに限られる。車両走行時の軸重計が受ける負荷 W_0 は、車両に生じる重力に由来する車軸重量 W_s と走行車両の振動により生じる動的負荷 W_d の和として書き下せる。 W_d が振幅 X 、周波数 ω の正弦波である単純なモデルを仮定すると、 W_0 は振動中心 W_s 、振幅 X 、周波数 ω の正弦波となる。OIML R134-1³⁰⁾は軸重計を A から F の 6 つの等級に分類しており、最も下位の分類 Fにおいて、軸重量計測の許容範囲は静的条件における軸重測定結果に基づく基準値から誤差 5% 以内と定められている。車両の走行速度が上がると、軸重計を通過するの

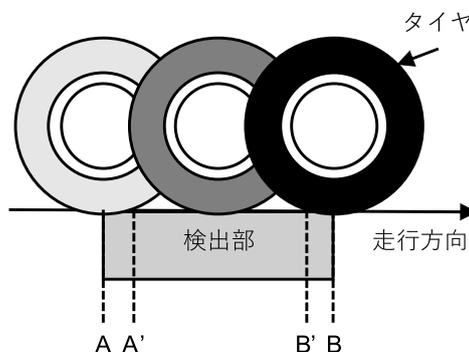
要する時間、すなわち軸重量計測のための計測時間が短くなることなどから、一般に走行車両の軸重計測は走行速度が高いほど高度な技術が要求される^{8),28)}。過積載車両取締りの精度向上や本勧告に準じた軸重量計測の実現には、短い計測時間で 10^2 Hz から 10^3 Hz 程度のオーダーの周波数で時間変化する衝撃力を高精度に計測する技術の開発や高度化が不可欠である。

4. 各 NMI における動的力標準と計測技術に関する取り組み

動的力計測の初期に取り組みされたのは、ドイツの NMI



(a) 軸重計測の模式図



(b) タイヤと軸重計検出部との位置関係の時間変化

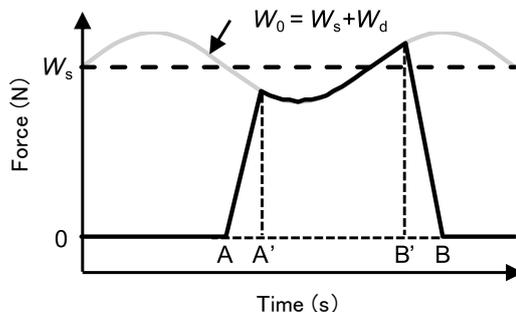


図 10 軸重計測の概要

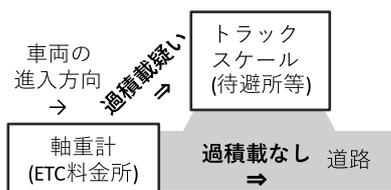


図 9 高速道路入口付近での指導取締りの模式図

(Physikalisch-Technische Bundesanstalt; PTB) によって実施された周期的力計測と衝撃力計測である³¹⁾。その後、欧州を中心とした国際連携は、近年でも活発に取り組まれている。2011年から2014年にかけて、欧州の9つのNMIが連携した共同研究プロジェクト¹⁰⁾が実施された。さらに、2015年から2018年にかけて、ComTraForce Project³²⁾という動的力計測に関連する国際プロジェクトが遂行された。本稿3章と同様に、各NMIの誌上発表^{10),31)}やホームページ^{11),12)}等でも、動的な力は周期的力と衝撃力にしばしば分類される。本章では、NMIにおける周期的力と衝撃力に対する取り組みについて紹介する。

4.1 周期的力計測に関する取り組み

研究初期の周期的力の計測装置は加振器、重錘、力変換器、加速度変換器、エアベアリング、ばねベアリングにより構築されていた³¹⁾(図11)。本装置では、重錘、力変換器、加速度変換器を加振器に取り付け加振させる。その運動を重錘上部に設置した加速度変換器により観察する。加振器ならびに重錘はエアベアリングならびにばねベアリングにより姿勢制御され、運動方向を制限されている。この際に加振運動は加振器上部に取り付けられた加速度変換器により制御されている。

その後、本装置から加振器のばねベアリングを取り除いた周期的力の標準機がPTBで開発され³³⁾、振動運動の観察を、加速度変換器ではなく、振動系に影響を与えず非接触に観察することができるレーザー振動計等を用いるなどの改良が実施された。近年では、力変換器、加振器、重錘、レーザー光学系を組み合わせた周期的力の計測装置(図12)が、PTB^{10),34)}、フランスのLaboratoire national de métrologie et d'essais (LNE)¹⁰⁾、

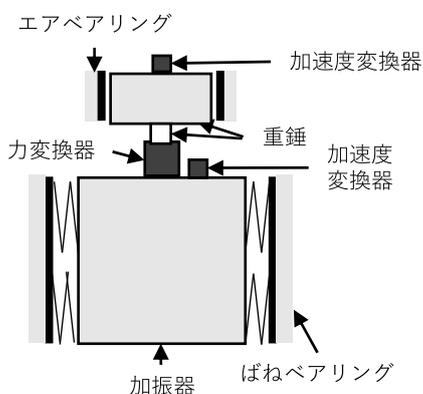


図11 研究初期の周期的力の計測装置

スペインのCentro Español de Metrología (CEM)^{10,33)}、アメリカのNational Institute of Standards and Technology (NIST)³⁶⁾、韓国のKorea Research Institute of Standards and Science (KRISS)³⁷⁾、ブラジルのInstituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO)³⁸⁾など各国のNMIにおいて開発されている。

周期的力の標準供給を実施しているNMI、装置に用いている加振器の加振力、相対拡張不確かさを表2にまとめる。周期的力計測技術の開発は、多くのNMIが取り組んでいるものの、標準供給を実施しているのはPTB¹¹⁾など数機関であり、さらにCMCを登録しているのはINMETROのみである³⁹⁾。

4.2 衝撃力計測に関する取り組み

上述のような、加振器を使った動的力計測では、入力信号にフィードバックをかけることにより高度な周期的力を発生することが可能となる。一方で、発生可能な力の大きさは加振器の出力に制限される。定格容量1MN以上の力変換器は、10kgから100kgオーダーの質量を有するため、図11や図12に示したような形式の動的力の計測装置では、1kNオーダーの大きさの計測が上限となっている(表2)。より大荷重の動的力の計測技術として、2つの重錘を衝突させた際に生じる衝撃力計測装置も、周期的力の計測装置と同時期から開発されている³⁰⁾(図13)。同装置では、2つの重錘を用意し、片方の重錘を油圧ユニットで加速させ、もう片方の重錘に衝突させることで衝撃力を発生させる。その運動をレーザー干渉計で観察することで重錘の変位を決定する。運動する重錘の質量 M と速度の時間変化 $\partial v/\partial t$ から、衝突に生じる衝撃力 F_1 を算出する($F_1 = M \partial v/\partial t$)。本衝撃力計測装置を用い、衝突する2つの重錘の間に力変換

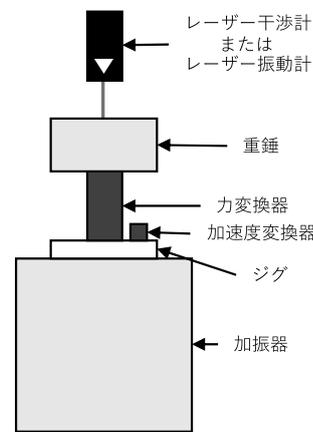


図12 近年の周期的力の計測装置

器を挟むことで、力計による衝撃力の計測が可能である。力計の表示値 F_2 と F_1 との重錘衝突直後のそれぞれの時間変化を比較することで、力計の衝撃力に対する応答性を校正することも可能である。PTB では、同様の原理に基づき、100 kg の2つの重錘を用いて 250 kN までの衝撃力計測装置が開発されている⁴⁰⁾。

同研究機関が発表した論文では、衝撃力計測の勧告、ガイドラインの作成、文書規格の実現の兆候が見られる⁴⁰⁾。本稿3章で述べた国内を中心とした産業界からのニーズだけでなく、動的力標準に関する国際的整合性確保の観点からも、NMIJ が動的力標準の研究開発を進める重要性は高いといえる。

5. NMIJ が取り組む動的力の発生・計測技術

NMIJ では動的力標準の実現に向けた第一段階として、動的力標準へのニーズが強まっている産業界を意識した動的力の発生技術と計測技術の開発に取り組む。具体的には、疲労試験における応力計測の高度化を念頭とした周期的力の発生及び計測技術と、トラックの軸重量計測の高度化を念頭とした衝撃力の発生及び計測技術の開発に着手する。

表2 周期的力の標準供給が実施されている校正範囲と相対拡張不確かさ

NMI	加振力	相対拡張不確かさ (包含係数 $k = 2$)
PTB	10 kN	0 Hz から 700 Hz: 0.5×10^{-2} 700 Hz から 1 kHz: 1.0×10^{-2} 1 kHz から 2 kHz: 2.0×10^{-2}
NIST	2 kN	100 Hz から 2 kHz: 2×10^{-2}
INMETRO	100 N	50 Hz から 8 kHz: 2.0×10^{-2}

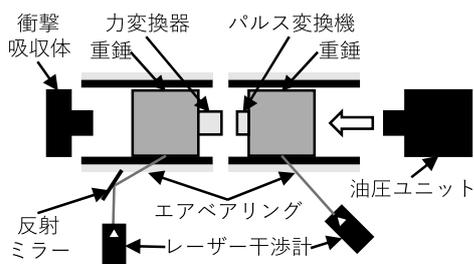


図13 衝撃力計測装置の概念図

5.1 周期的力の発生・計測技術

力計を用いた高速疲労試験の応力測定は、最大周波数 1 kHz にて実施されている。NMIJ では、まず約 10 Hz から 1 kHz までの周期的力の発生装置の開発を進める。具体的には、図12を模した、力変換器、加振器、重錘、レーザー光学系により構成された装置の開発を予定している。研究の初期段階では、加振力 2 kN の加振器を用い、他の NMI で既に実施されている力の大きさ及び周波数において、同等程度の不確かさで周期的力の発生を目指す。その後、加振力がより大きな加振器を導入し、周期的力の大きさの範囲を拡大していく計画である。

5.2 衝撃力の発生・計測技術

走行車両の軸重量計の測定範囲は 5 t から 20 t 程度である。NMIJ では、その範囲を網羅する最大約 540 kN (質量換算約 55 t) の実荷重式力標準機を有している。つまり、この実荷重式力標準機を改良することで、実用先として想定される質量に対する動的力の発生が可能となる。本稿4章で述べた通り、既存の衝撃力発生装置は、最大で 100 kg の物体を運動させているため、本装置が実現されれば世界最大級の衝撃力発生装置となる。トンオーダーとなる大質量の負荷枠及び重錘の吊り下げや落下運動を制御する機構と、重錘の運動を観察する計測システムを実荷重式力標準機に導入することで、研究の初期段階では、力の大きさ 100 kN、周波数 100 Hz オーダー、不確かさ 5 % 以内となる衝撃力発生装置への改良を計画している。

6. おわりに

産業界における動的力標準と計測の需要、発生及び計測技術を探り、他 NMI が取り組む動的力計測に関する研究について調査した。大きさが時間変化する動的な力は、自動車産業、航空産業、製鉄業、インフラ事業等を中心に多様な産業においてニーズが高まっている。その背景から、CMC の登録はブラジル INMETRO のみに限定されるものの、多くの NMI が動的力の発生及び計測装置の研究に着手している。本調査で得た情報や知見を活かし、今後は NMIJ でも動的力の発生及び計測にかかる研究を推進していく。

謝辞

本調査研究を行うにあたり、ご指導、ご助言をいただいた力トルク標準研究グループの林敏行主任研究員、西

野敦洋研究グループ長、大串浩司上級主任研究員をはじめとした多くの皆様に厚く御礼申し上げます。また、実際に訪問させていただき、本調査に関する情報を提供いただきました企業や研究機関の皆様にも深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) JIS B 7721: 2018: 引張試験機・圧縮試験機一力計測系の校正方法及び検証方法。
- 2) JIS B 7728: 2013: 一軸試験機の検証に使用する力計の校正方法。
- 3) ISO 376: 2011: Metallic materials — Calibration of force-proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines.
- 4) ISO 7500-1:2018: Metallic materials — Calibration and verification of static uniaxial testing machines — Part 1: Tension/compression testing machines — Calibration and verification of the force-measuring system.
- 5) ASTM E4-21: 2021: Standard Practices for Force Calibration and Verification of Testing Machines (2021).
- 6) ASTM E74-18: 2018: Standard Practices for Calibration and Verification for Force-Measuring Instruments.
- 7) 独立行政法人製品評価技術基盤機構 . <https://www.nite.go.jp/iajapan/jcss/labsearch/index.html>.
- 8) 小野敏郎 . 計測と制御 , 37, 2 (1998).
- 9) Y. Fujii. *Measurement*, 42 (2009).
- 10) C. Bartoli, M. F. Beug, T. Bruns, C. Elster, T. Esward, L. Klaus, A. Knott, M. Kobusch, S. Saxholm, and C. Schlegel. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 3, 3 (2013).
- 11) PTB. <https://www.ptb.de/cms/en/ptb/fachabteilungen/abt1/fb-12/ag-123/>.
- 12) NIST. <https://www.nist.gov/programs-projects/dynamic-mechanical-metrology-acceleration-force-and-acoustics>.
- 13) 村田守 . 圧力技術 , 20, 1 (1982).
- 14) 梅田章 . 計測と制御 , 27, 6 (1988).
- 15) 田中真一 , 吉岡純夫 , 井上彰夫 . 材料 , 35, 396 (1986).16) J. A. M. McDonnell. *Journal of Physics E-Scientific Instruments*, 20, 6 (1987).
- 16) J. A. M. McDonnell. *Journal of Physics E-Scientific Instruments*, 20, 6 (1987).
- 17) 西田新一 . 溶接学会誌 , 62, 8 (1993).
- 18) 酒井達雄 , 田中伸明 , 岡田憲司 , 古市真知子 , 西川出 , 菅田淳 . 日本機械学会論文集 A 編 , 70, 696 (2004).
- 19) 酒井達雄 , 上野明 . マリンエンジニアリング , 44, 5 (2009).
- 20) 塩澤和章 , 島谷祐司 , 村田将一郎 , 魯連涛 , 李思曾 . 日本機械学会論文集 A 編 , 78, 793 (2012).
- 21) Y. Furuya. *ISIJ International*, 61, 1 (2021).
- 22) T. Naito, H. Ueda, and M. Kikuchi. *Metallurgical Transactions a-Physical Metallurgy and Materials Science*, 15, 7 (1984).
- 23) 酒井達雄 , 武田光弘 , 塩澤和章 , 越智保雄 , 中島正貴 , 中村孝 , 小熊規泰 . 材料 , 49, 7 (2000).
- 24) 松浦融 . 軽金属 , 68, 6 (2018).
- 25) C. Bathias and P. C. Paris. *Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice*. CRC Press (2004).
- 26) 古谷佳之 , 松岡三郎 , 阿部孝行 . 電気製鋼 , 75, 1 (2004).
- 27) 道路法 , 昭和二十七年法律第八十号 .
- 28) 藤原寛行 , 吉田浩治 , 福田謙吾 , 衣笠哲也 , 藤本真作 . 自動制御連合講演会講演論文集 , 54 (2011).
- 29) 国土交通省プレスリリース . <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001521199.pdf>
- 30) OIML R 134-1: 2006: Automatic instruments for weighing road vehicles in motion and measuring axle loads.
- 31) T. Bruns, R. Kumme, M. Kobusch, and M. Peters. *Measurement*, 32, 1 (2002).
- 32) ComTraForce. <https://www.ptb.de/empir2019/comtraforce/project/overview/>
- 33) R. Kumme. *in XVII IMEKO World Congress Metrology in the 3rd Millennium*, Dubrovnik, Croatia (2003).
- 34) C. Schlegel, G. Kieckenap, B. Glockner, A. Buss, and R. Kumme. *Metrologia*, 49, 3 (2012).
- 35) N. Medina and J. de Vicente. *Sensors*, 14, 10 (2014).
- 36) N. Vljajic and A. Chijioko. *Metrologia*, 53-4 (2016).
- 37) Y. K. Park, R. Kumme, D. Roeske, and D. I. Kang. *Measurement Science and Technology*, 19, 11 (2008).
- 38) C. Hof and G. Zwahlen. *Measurement Science and Technology*, 23, 12 (2012).
- 39) BIPM. <https://www.bipm.org/kcdb/>
- 40) M. Kobusch, T. Bruns, L. Klaus, and M. Muller. *Measurement*, 46, 5 (2013).

