

材料試験硬さ技術の系統化調査

Historical Development of Material Hardness Testing Technologies

小賀 正樹 Masaki Koga

■ 要旨

硬さは種々の機械特性と相関関係があることから、硬さ試験による材料評価は新たな材料開発や機器構成部材の性能、コスト、信頼性等を考慮した“着実なものづくり”を行う上で必須の基本技術として、ひいては我国工業製品の材料強度信頼性を陰で支える重要な工業技術（製造工程での品質管理や商取引・受入れ検査の手段）として発達してきた。本調査研究ではこの“材料試験硬さ技術”について、① 硬さ研究と試験法考案、② 試験方法・試験機・基準片の開発とその変遷、③ これらを支える周辺技術、④ JIS 規格化と国際標準化、の観点から調査結果を纏めた。

材料の硬さ試験においては、圧子やハンマーで静的または動的に変形を与え、材料が示す塑性流動過程の抵抗度合いを測定し、硬軟の序列数を決めているが、今日までに考案された硬さ試験機の種類はきわめて多く、それぞれの試験法により特有な硬さ値となっている。ここでは調査対象の試験機を、現在産業界で多用されている JIS 規定の 4 種類の試験機、つまり、ブリネル、ショア、ロックウェル、ビッカース（含・ヌープ）の各硬さ試験機、とその延長上で産業界の更なるニーズに対応すべく進化を遂げつつある高温硬さ試験機、携帯型硬さ試験機、超微小硬さ試験機、基準片に付せられる硬さ基準値を得るための“基準硬さ試験機”に限定した。また、その関連技術として、工具メーカーが製作分担するダイヤモンド圧子や基準片の開発と変遷についても併せ調査した。

ものづくりの世界では硬さ試験は縁の下の力持ち的存在ではあるが、産学官の関係者に共通し、かつ、一貫したものとして、“着実なものづくり”への熱い思いと日本人由来の生真面目さ（硬さ研究と試験機開発への真摯な取り組み）が長年の学協会・研究会活動で伝統的に培われてきた。これらが原動力となって第 2 次大戦後の産業復興以降、我国の硬さ試験機メーカーは従来の海外オリジナルメーカー製品の模倣から脱皮して独自の製品開発に進出し、今日では世界をリードするまでになった。その顕著な成果は、微小硬さ（マイクロビッカース）試験機とその延長上にある超微小硬さ（ナノインデンテーション）試験機の変遷にみられる。オリジナル機では 100% 機械式であった硬さ試験機も今では負荷機構に電気駆動方式をまた計測機構・データ処理部に各種センサーや電子デバイスを採用した電気・電子機器に様変わりし、試験荷重に関しても、最大負荷 3000kgf のブリネル硬さ試験機に対し最小負荷が mgf オーダーの超微小硬さ試験機が出現する時代となった。これを可能にした背景には、① 産学、産官連携による試験機開発や試験機メーカー間の切磋琢磨による創意工夫（負荷・計測機構の考案）とその知的財産化（特許、実用新案による権益確保）、② 国内素材メーカーの優れた材料製造技術と町工場が保有する高レベルの機械加工技術、熱処理技術、③ 世界をリードする我国のセンサー技術（荷重・変位計測に適用）や画像処理技術（圧痕形状計測に適用）等の基盤技術、④ 顧客（材料・機器の研究開発やものづくり現場）からのより高度な硬さ試験へのニーズがあった。また、戦後の産業復興期にいち早く発足した“硬さ基準片製作標準作成委員会”や“カタサ研究会ロールカタサ研究部会”の活動に代表されるように、学協会の研究会・講習会活動等で産学官が連携して硬さ試験による品質管理手法を産業界に普及・定着させた功績もきわめて大きい。

これらを鑑みると、今後材料試験硬さ技術を更に発展させるためにやるべきこととして、① 世代間での硬さ測定技術の着実な継承、② 硬さ試験機の測定精度向上とその計測自動化、③ 硬さ試験適用分野の拡大、④ 国際標準化活動の推進、⑤ 硬さ現象の本質的な解明（普遍的に認められる“硬さ”の定義確立）等がある。試験・評価技術や試験機開発と併せ、JIS・ISO 等の新規格を積極的に提案、承認・実施に至れば、我国工業製品の強度安全性や国際競争力の向上にも大きく寄与する。産業グローバル化の観点からは、各種部品・部材の検査に用いられる硬さ試験機や基準片のトレーサビリティも重要性が増すであろう。また、適用分野拡大では、今後も引張、疲労、クリープ、摩耗、ばね限界値、焼入性、溶接性等に関連する硬さ測定データの充実を図り、産業界からの新たなニーズに対応していくことが強く望まれる。

■ Abstract

Material evaluation due to the hardness test has progressed as an indispensable basic technique to do steady manufacture, considered the performance, cost and reliability of a raw material or a component of equipment, because the hardness of material correlates with its various mechanical properties. And so, it has been recognized as an important industrial technology (means of the quality control in manufacturing process, the transaction or the acceptance inspection) to support behind the material strength reliability of an industrial product manufactured in our country. In this research on the material hardness testing technologies, the results were settled from the four view points, i.e. ① study of the hardness and invention of the testing method, ② development and transition on the testing methods, testers and standard blocks, ③ supporting technologies and ④ JIS and international standardizations.

On the hardness test, static or dynamic deformation is caused in the measured material by adding a load through an indenter or a hammer, and a hardness value is ranked by its resistant degree against permanent flow. A great many kinds of hardness testers have been invented up to the present and their calculated hardness values differ from each other, resulting from the difference of their definitions. In this investigation, the object of hardness testers were limited to four kinds of testers standardized by JIS, i.e. Brinell, Shore, Rockwell and Vickers testers, and their prolonged testers to meet still more industrial needs, i.e. high temperature hardness tester, portable hardness tester, nano indentation hardness tester and "Basic Hardness Tester" evaluating the numerical hardness value of a standard block. As related technologies, the development and transition of diamond indenters and standard blocks, being made by tool makers, were also investigated.

Through a longtime activities at the relevant association or workshop, hardness participators, formed by industrial-academic-governmental cooperation, have cultivated traditionally a strong thought to "faithful manufacturing" as well as the sincere approach to hardness research and tester development with particular seriousness originated Japanese. Taking opportunity of industrial recovery after the Second World War, these became moving force to go forward independent development for hardness tester makers in our country, gotten rid of the copy from a past overseas original tester, and so, the Japanese hardness tester has become to lead the world today. Such fruits are seen in the transition of micro hardness (micro Vickers) tester and ultra micro hardness (nano indentation) tester. Nowadays, a hardness tester has replaced completely to an electric equipment, adapted an electric driving force as loading mechanics, various sensors as measuring mechanics and electronic devices as data processing, though the mechanics of each original hardness tester was all machinery. And the testing load of 1mgf order at a minimum has come into existence in nano indentation tester, differing with 3000kgf at a maximum in Brinell tester. For the background to enable these matters in our country, there were some excellent basic technologies in circumstance as follows, as well as the effort of parties concerned. ① development of the tester due to cooperation industrial-academic or industrial-governmental and creative ideas, studied hard by competing with each other among tester makers, and the security of these interests due to the intellectual property right, ② high qualitative material supplied by manufacturer possessing its distinguished producing technology, and excellent techniques of machining and heat treatment held by small factory, ③ technologies of sensor and image processing, leading the world, ④ advanced needs from user (the fields of development or operation in manufacture). As typified activities for the hardness standardization at an early stage of industrial recovery after the war, the workshop and the training course, practiced by association periodically under industrial-academic-governmental cooperation, have contributed greatly to spread the quality control due to hardness test in the industrial world.

In consideration for these investigation results, the author suggests several items as follows for further development on a hardness tester in future. ① steady succession of the hardness testing technique from a skillful engineer to a young engineer, ② improvement of measurement accuracy and automatic operation system of the hardness tester, ③ spread of applied field on the hardness test, ④ newly proposal of an international standard draft and its promotion to standardization, ⑤ essential elucidation of the hardness mechanism, i.e. establishment of an universal definition on the hardness.

■ Profile

小賀 正樹

Masaki Koga

国立科学博物館産業技術史資料情報センター 支援研究員

昭和54年3月 武蔵工業大学大学院博士課程修了
鉄鋼材料の腐食疲労に関する研究で学位取得
昭和55年1月 株式会社明電舎入社、総合研究所に所属
重電機器への材料適用技術開発に従事
平成2年4月 主任技師、水晶応用SAWデバイスの開発に従事
平成6年4月 超高速永久磁石発電機の開発・試作に従事
平成10年4月 副技師長、全社材料規格策定(材料部門委員長)
平成11年11月 主幹技師、エネルギー事業本部で新エネ機器、小規模分散電源の調査、新規事業化に参画
平成13年度 琉球大学地域共同研究センター客員教授(兼務)
平成13～16年度 日本材料試験技術協会 副会長
平成14～15年度 NEDO新エネルギー技術開発部に出向
新エネ導入・バイオマス実証試験事業を担当
平成17～19年度 熊本大学地域共同研究センター客員教授(兼務)
平成18年9月 株式会社明電舎退社
現在 国立科学博物館産業技術史資料情報センター支援研究員、日本材料試験技術協会常任理事

■ Contents

1. はじめに	3
2. 硬さ研究のあゆみ	4
3. 我国における硬さ研究活動	8
4. 日本工業規格(JIS)にみる硬さ試験	11
5. 硬さ試験機の開発、技術の変遷	18
6. 硬さ試験機の高性能化を支える周辺技術	51
7. 硬さ基準片の開発、技術の変遷	56
8. ものづくり現場における硬さ試験の利用	62
9. 硬さ試験の国際標準化	66
10. むすび	70

1 はじめに

種々の工業製品の研究開発や製造現場、いわゆる“ものづくり”現場では、金属材料の素材や機器構成部材の製造工程において、その材質、機械加工、熱処理、表面処理等の品質管理を簡便にかつ直接現物で非破壊的に行うのに、現在、最も身近で有用な材料試験として“硬さ試験”がある。硬さそのものは「長年にわたる膨大な研究がありながら、硬さの定義はまだ確立されていない」という本質的な課題を抱えながらも、今ではこの硬さ試験による材料評価は、種々の機械特性との相関からその有用性が認められ、新たな材料開発や機器構成部材の性能、コスト、信頼性等を考慮した“着実なものづくり”を行う上で必須の基本技術として、ひいては我国工業製品の材料強度信頼性を陰で支える重要な工業技術(製造工程での品質管理や商取引・受入れ検査の手段)として発達してきた^{*1~3)}。その一方で昨今は、“一方的な製品輸出から現地生産への移行”や“他国との製品生産の棲み分け”にみられるような企業活動のグローバル化に伴い、産業分野によっては国内での産業空洞化が懸念される等、我国のものづくり環境は大きく変化しつつある。

このような状況を鑑み、本調査研究テーマ「材料試験硬さ技術の系統化調査」においては、材料試験分野での技術継承の一助とすべく、多くの人々の努力で今やこの分野で世界をリードするまでに発展した我国の硬さ試験技術について、“戦後の急速な産業復興とその後の発展”、“関係者のものづくりへの情熱”、“産学官の一致協力”をキーワードに、主に ① 硬さ試験の研究・考案、② 硬さの試験方法・試験機・基準片の開発と変遷、③ これらを支える周辺技術、④ その規格化と国際標準化、の観点から取り纏めた。

第2章では、本調査報告の始めとして、18世紀後半から最近までの国内外での硬さ研究・試験法考案の経緯とこれらを通して明らかになってきた硬さの有用性と問題点について述べた。第3章では、第2次世界大戦敗戦後の我国における産業復興と高度経済成長(各種工業製品の量産化、高機能化、高信頼化)の過程で、ものづくり技術を材料試験分野から産学官連携で積極的に支援してきた硬さ研究活動について、また、

第4章ではその研究成果をもとに日本工業規格(JIS)として制定され、その後の時代のニーズに合わせて幾多の改定を経て現在に至る“ブリネル、ショア、ロックウェル、ビッカース、ヌーブ”の各硬さ試験JIS規格(試験法、試験機、基準片)についてその骨子を纏めた。

第5章では、これら試験に用いられる各硬さ試験機と、その延長上で産業界の更なるニーズに対応するための高温硬さ試験機、携帯型硬さ試験機、超微小硬さ試験機や基準片に付す基準値を得るための“基準硬さ試験機”について、その開発、技術の変遷を時系列で整理した。また、硬さ試験機の高性能化を支える周辺技術として、ダイヤモンド圧子・ハンマーの高精度加工と硬さ試験用荷重検定器を、第6章で別途取り上げた。第7章では、各産業界のものづくり現場で硬さ試験機の“間接精度検証”に用いられ、試験機の精度管理上必須の試験片(工具)となっている硬さ基準片について、その開発、技術の変遷を纏めた。

第8章では、硬さ試験機を使用する側の取り組みとして、ものづくり現場における硬さ試験利用の意義とその実状(適用事例)について述べた。また、第9章では、計量研究所(現・産業技術総合研究所)が中心となって長年実施してきた国際標準化活動とその変遷について纏めた。第10章では、本調査報告の結びとして、今回の調査で感じたことや今後の硬さ試験のあり方、可能性について思うところを述べた。

参考文献

- * 1) 編・執筆者 吉沢武男、執筆者 財満鎮雄、黒木剛司郎、町田周郎、寺沢正男、依田彦三郎、西畑三樹男、関谷三郎、山城貞男、山口章三郎: “硬さ試験法とその応用”、裳華房刊、P. 220 ~ 354 (1967) [昭和 42 年]
- * 2) 寺沢正男: 「硬さのおはなし」、日本規格協会刊、P. 29 ~ 51 (1981) [昭和 56 年]
- * 3) 西畑三樹男: 「材料試験 基礎のきそ」、日刊工業新聞社刊、P. 33 ~ 52 (2008) [平成 20 年]

2 | 硬さ研究のあゆみ

2.1 硬さ研究の経緯

(1) 百花繚乱の試験法・試験機提案と硬さ値定義

硬さは工業量であって的確な物理量ではなく、百年以上にわたり国内外で膨大な研究があるにもかかわらず、硬さそのものの定義は未だ確立されていない。それ故、今日まで実に多様な試験方法・試験機が考案され、個々の考案者の独断でその測定方法や硬さ値算定法を定義してきたというのが実状である。表 2.1-1 と表 2.1-2 には、このような長年にわたる国内外での硬さの研究、試験方法・試験機の考案において、その主だったものを年表に纏めた^{*1~7, 1~3)}。

これら試験方法・試験機のうちで、最も値の確からしいもの、つまり、細かい数値まで正確に求めやすく、使いやすいものが、長い歴史のフルイにかけられて残ってきた。これを試験方法で分類すると、① 静的に押込む方法：ブリネル、ロックウェル、ビッカース、ヌープ、ナノインデンテーション硬さ等、② 動的に（衝撃で）押込む方法：ショア、ハーバード、リープ硬さ等、③ 標準物体で引っ掻く方法：マルテンス、ビヤバウム硬さ等、の 3 種類に大別される。

(2) 摩訶不思議な“硬さ”なるもの

硬さは物体の強固さの程度を示すものと考えられ、強さ、粘さ、脆さ、展延性、耐摩耗性等 材料の基本的な諸性質が複雑に結合したものといえる。“硬い、軟らかい”は日常生活において誰でも使っている表現方法で、その比較からどちらが硬いかを感覚的に区別できるが、硬さの本質は非常に難しく、まだ“一言で硬さとはこういうことだ”と明言できるものがない。「常識では誰でも知っているのに、学問的にはよく分からない!」、硬さは実に不思議な代物といえる。現時点では、多くの研究者が知恵を絞って考えた「ある物体の硬さとは、それが他の物体によって変形を与えられようとするときに呈する抵抗の大小を示す尺度である」という概念的な表現で、暫定的に定義されている^{*1)}。

(3) 硬さ評価のニーズは時代とともに

“どちらの方がどれだけ硬いか、どれだけの使用に耐えられるのか? ”、これは石器、青銅器、鉄器時代から現代（鉄・非鉄金属、プラスチック、ファインセラミックス、金属・セラミックス薄膜、複合材料、電子デバイス等の微小部材）に至るまで大きな課題であ

るが、その時代の技術レベルの範囲内で時のニーズ（用途）に対応する種々の硬さ評価手法が研究・開発されてきたといえる。

2.2 硬さの有用性と問題点^{*1, *2)}

近年 工業技術分野で硬さの有用性（ニーズ）は益々高まっているものの、硬さ評価という観点からみれば、今もまだいくつかの課題を抱えている。

(1) 硬さの有用性

材料の機械的性質を調べる材料試験は全て破壊試験で、試験片を壊してその良否を求める。硬さ試験も破壊試験の一つではあるが、破壊の程度が極小さく実用品の使用上なんら影響を与えないことから、唯一、非破壊的であるといえる。

材料の機械的性質を推定するのに硬さは最も簡便な手段で、利用度も極めて広い。硬さは引張強さの代用特性として活用されるので、設計者は機械的性質と硬さの関係を熟知した上で現場の熱処理担当部署に渡す図面や伝票に所定の硬さ値を明示し、その検査体制も確認する必要がある。つまり、硬さ試験は製造工程における品質検査のかなめとなり、材料強度信頼性で機械の死命を制する重要な役目を担う。また、納品検査時にも、部品を試験機で壊して材料強度の合否判定はできない。検査の拠り所として、機械的性質との関係が分かっている硬さでチェック（所定の硬さ範囲で合否判定）せざるを得ない。その際には各社の硬さ試験機の硬さ値が一致しないと困る。この橋渡しをするものとして“硬さ基準片”がある。

(2) 硬さの問題点

硬さの本質的な定義がないので、各試験方法で求めた硬さ値の間に理論的相関性はなく、硬さ値換算は全て実験による以外に手段を見出せない。同系の材料の硬さは比較できても、異種の材料間の硬さが本質的に同じかどうかは大きな疑問として残っている。硬さを利用する場合には、使用材料の性質や目的等を十分に配慮し、どの試験方法が最適かを十分検討して用いないと、得られたデータの利用価値はなくなってしまう。硬さは変形と抵抗、強さ、破断は原子の結合に帰着し、弾性学、弾塑性学、塑性学、粘弾性学、原子物理学等を含む学際領域の問題であることより、硬さの正しい利用を通して他の機械的性質との相関性を研究することとは、今後の大きな課題である。

[参考文献]

- * 1) 寺沢正男:「硬さのおはなし」、日本規格協会刊、P. 1 ~ 212 (1981) [昭和 56 年]
- * 2) 寺沢正男・岩崎昌三 共著:「硬さのおはなし (改訂版)」、日本規格協会刊、P. 1 ~ 214 (2001) [平成 13 年]
- * 3) 寺沢正男:“材料と硬さ試験”、材料試験技術研究会、「硬さ試験の自動化」講習会テキスト、P. 1-1 ~ 1-22 (1977) [昭和 52 年]
- * 4) 編・執筆者 吉沢武男、執筆者 財満鎮雄、黒木剛司郎、町田周郎、寺沢正男、依田彦三郎、西畑三樹男、関谷三郎、山城貞男、山口章三郎:“硬さ試験法とその応用”、裳華房刊、P. 220 ~ 354 (1967) [昭和 42 年]
- * 5) D. Tabor :「The Hardness of Metals」、Oxford University Press 刊、初版 (1951)、再版 (2000) (日本語版) 中村雅勇 監修、山本卓 訳: (株) 山本科学工具研究社発行、P. 1 ~ 181 (2006) [平成 18 年]
- * 6) 西畑三樹男:「テストロニクスとその応用」、日刊工業新聞社刊、P. 39 ~ 64 (1994) [平成 6 年]
- * 7) 中村雅勇:「硬さ試験の理論とその応用」、工業調査会刊、P. 1 ~ 188 (2007) [平成 19 年]

[注]

- 1) E. S. Berkovich: “Three-Faceted Diamond Pyramid for Micro-Hardness Testing”、Industrial Diamond Review、Vol. 11、No. 127、June、P. 129 ~ 133 (1951)
- 2) 佐田登志夫: “ダイナミック超微小硬度計の開発まで”、島津科学器械ニュース、Vol. 27、No. 5、P. 1 ~ 2 (1986) [昭和 61 年]
- 3) C. Heermant, D. Dengel (片山繁雄、佐藤茂夫 訳): “ユニバーサル硬さ試験による材料特性の評価”、材料試験技術、Vol. 43、No. 2、P. 148 ~ 152 (1998) [平成 10 年]

表2.1-1 硬さの研究、試験法考案のあゆみ[その1:1772~1925年]*1~7)

年代	研究・考案者	内 容	特記事項
1772	レミュー	・2 個の三角柱の稜を直角に交差させて押圧、潰れた方が軟らかいという、硬さ比較法を考案	「静的硬さ試験」の始まり
1822	モース	・こすり合わせて傷のつく方が軟らかいという、引掻き硬さを考案 (10 個の鉱石で「モース硬さ」の尺度を決める)	「引掻き硬さ」の始まり
1833	ジーバック	・引掻き硬さの基礎について見解を述べる	「引掻き硬さ基礎」
1890	マルテンス	・対面角 90° のダイヤモンドピラミッドで引掻く硬さ試験機を作り、0.01mm の引掻き幅を与える荷重 (gf) を硬さ値にする	「引掻き硬さ試験機」
—	マルテンス	・圧子を材料に押込んだ時に、一定のくぼみの大きさを生じさせるのに要した荷重の大きさを硬さで表現した ・利点は、押込みで生じる加工硬化が一定の下で硬さを比較できることにある	「マルテンス硬さ」
1895	マーテル	・落下ハンマーによる反発硬さについて発表	「反発硬さ」の始まり
1897	フェッブル	・2 個の円柱を交差させ、静的圧力によるくぼみ面積で荷重を除して硬さ値を求める方法を考案	今日の「静的押込み硬さ」に類似
1900	ブリネル (スウェーデン)	・鉄鋼の硬さを知るために「ブリネル硬さ試験」を考案、現在も広く用いられる ・球圧子を用い、試料にくぼみをつけた時の荷重を永久くぼみ直径から求めたくぼみ表面積で除した商を、硬さ値にする ・パリ博覧会に試験機を展示 [硬さ試験が工業界で注目される動機となる]	「ブリネル硬さ試験」
1907	ショア (アメリカ)	・垂直筒中を圧子ハンマーが自然落下、その反発高さから硬さ値を求めるショアスケロスコープ(現在の C 型機)を考案し、現在も広く用いられる ・反発硬さの基礎を確立 [大型部品や圧延ロール等の硬さ測定で賞用]	「ショア硬さ試験」
1908	マイヤー (ドイツ)	・球を試料の表面に押込んだ時のくぼみの投影面積でその時の荷重を除したものを、「マイヤー硬さ」という ・永久くぼみの投影面積当りの平均圧力で硬さを求め、「マイヤーの相似則」を提唱、今日でも理論的に優れる	「マイヤー硬さ」 「マイヤーの相似則」
1908	ルドウィック	・頂角 90° の円錐圧子を用い、荷重を加えて押込むとくぼみは相似形になるので変形に対する比例則が成立し、硬さは荷重に無関係になることを発表 ・荷重が小さくなると圧子先端形状が影響するので、初期荷重を、次に所定荷重をかける [ロックウェル硬さに発想引用]	「ルドウィック硬さ」
1910	シュナイダー	・反発硬さについて発表	
1918 (大 7)	本多、佐藤 (日本)	・振り子の衝撃で生じた試料のくぼみの大きさから圧子の消費した運動エネルギーを硬さで表したり、反発の度合いを硬さで求める試験法を案出 [1925(大 14)、佐藤はこの振り子衝撃硬さ試験機により高温硬さを測定]	「振り子衝撃硬さ」 「高温硬さ」
1919	ロックウェル (アメリカ)	・圧子の押込み深さから硬さを求める量産工程に向けた試験方法を考案し、ウィルソン社で製品化、今日工業界で最も広く用いられる ・ダイヤモンド円錐圧子又は鋼球圧子を用いて、最初に基準荷重を、次に試験荷重を加え、再び基準荷重に戻して、ダイヤルゲージ等で基準荷重における圧子進入深さの差を求め硬さ値とする	「ロックウェル硬さ試験」
1920	ハイ	・相互押圧で四角柱の稜のつぶれと荷重から硬さを求めることを考案	
1923	ハーバート	・ヤジロベエ式の振り子の振動回数から硬さを求める ・ヤジロベエの重さは約 4kg、圧子は直径 1mm のダイヤモンド球、試料が硬いと比較的長く揺れるが、軟らかいと圧子ののめり込み大で抵抗が大きくなり、早く停止する	「ハーバート硬さ」
1923	エドワード	・衝撃押込み硬さを考案	「衝撃押込み硬さ」
1925	スミス、スタン ドランド (イギリス)	・ビッカース硬さ試験方法を考案、ビッカース・アームストロング社で製品化され、現在も広く用いられる ・正四角錐ダイヤモンド圧子の圧痕対角線長さから硬さ値を求める [ビッカース硬さにより試験荷重に依存しない硬さ測定が可能となる]	「ビッカース硬さ試験」

表2.1-2 硬さの研究、試験法考案のあゆみ[その2:1925～1998年]*1～7、1～3)

年代	研究・考案者	内 容	特記事項
1925	タッカーマン	・硬さの概念について発表〔“硬さは耐磨耗性、引掻き抵抗、切削抵抗、塑性変形抵抗、弾性係数、降伏点、引張強さ、保磁力、弾性振動減衰等、多くの属性を含んでいる”〕	「硬さの概念」
1928	ハーバート	・熱処理した試料面に多数の鋼球を落下させ、くぼみの分布から硬さむらを調べる「クラウドバースト法」を考案	「クラウドバースト法」
1930	ビヤバウム	・引掻き硬さについて発表 ・圧子に 3gf の荷重をかけて、引掻き傷の2乗の逆数で硬さを表現、圧子は立方体ダイヤモンドで、一つの稜が試料面に対し 35° 傾いた状態で使用	「ビヤバウム硬さ」
1931 (昭 6)	松村 (日本)	・一定深さまで圧子を押込んだ時の単位面積当りの仕事量を硬さで求める ・1933 年、シカゴ博覧会に試験機展示	「松村硬さ」
—	ヘルツ	・同種の材料の球を球面又は平面に押付け、永久変形が生じ始める時の接触面における最大圧力をもって硬さとする	「ヘルツ硬さ」
1934	シャイル	・荷重 20gf で引掻いた時の傷幅の逆数を硬さ値とする(傷幅は 1μm の何倍か)	「シャイル硬さ」
1934	オニール	・硬さの難しさについて解析〔“軟らかい 硬いということの経験は容易だが、硬さの本質を表現することは難しい”〕	「硬さの解析」
1935	バターソン	・動的硬さ試験法を開発	「動的硬さ試験」
1937	リヒテル	・ピラミッド圧子の対面角を 120° とし、傷幅 0.003mm の引掻き傷を作るのに要する荷重を 0.01gf 単位で表した値を硬さにすることを提唱	「リヒテル硬さ」
1939	ヌープ	・断面が菱形のダイヤモンド四角錐による硬さ測定を考案、今も広く使われる	「ヌープ硬さ」
1942	ウィリアムス	・従来と全く考えの異なる「磁気硬さ」について発表	「磁気硬さ」
1944 (昭 19)	吉沢 (日本)	・ビッカース硬さからショア硬さを換算する VHS の考え方を発表、現在のショア硬さの基礎を作り、JIS に規定される	「VHS 硬さ換算」
1949	ライサート	・高温硬さについて発表	「高温硬さ」
1951	テーバ (イギリス)	・硬さを総括的に解析し、現在の硬さの考え方を確立、その功績は極めて大 ・圧子押込みの平均圧力は、材料降伏応力の約 3 倍であることをつきとめた	「硬さの総括的解析」
1951	バーコビッチ (ロシア)	・微小硬さ試験用ダイヤモンド圧子として、加工精度上 稜線形成が不可避のビッカース四角錐圧子に替えて、稜間角 115° の三角錐圧子を考案	「バーコビッチ圧子」
1951 (昭 26)	吉沢 他 (日本)	・吉沢が中心となり、ショア硬さ基準統一のため、「硬さ基準片製作標準等作成委員会」が発足	「硬さ基準片製作標準等作成委員会」
1954 (昭 29)	— (日本)	・「関西カタサ研究会」が発足し、中川が反発硬さ、猪俣が磁気硬さについて発表〔後に 現「日本材料試験技術協会」に統合〕	「関西カタサ研究会」
1956 (昭 31)	— (日本)	・「カタサ研究会」が発足し、一貫して硬さの研究が行われ、成果は JIS 規格に採用される〔現「日本材料試験技術協会」の前身〕	「カタサ研究会」
1960 (昭 35) 前後	計量研究所 他 (日本)	・ブリネル、ビッカース、ロックウェル、ショア等の標準について研究成果を発表〔長年にわたり、莫大な研究費と労力で各機種の研究を進め、大学・各専門機関でも研究、成果は膨大かつ優秀で国際的にも高く評価される〕	「硬さ試験の標準化研究」
1963	ウィルソン	・放射線による硬さ試験法について発表	「放射線硬さ」
1969	クリーサッテル	・超音波硬さ試験法について発表、圧子が試料に押込まれた量を電氣的に周波数に換えて硬さを知る	「超音波硬さ」
1975	リープ (スイス)	・コイルばねを用いて超硬合金のハンマーを跳ね飛ばす方式のエコーチップ硬さ試験機を考案、上面のみでなく側面や下面も測定できる〔現場向き〕 ・ハンマーの衝突前後の速度比で硬さ値を算定するリープ硬さを提案	「エコーチップ反発硬さ試験機」 「リープ硬さ」
1984 (昭 59)	島津製作所 (日本)	・理化学研究所との共同開発で、バーコビッチ圧子を用いて試験力と圧子侵入深さの関係を計測する「ダイナミック超微小硬度計DUH-50」を製品化〔世界初のナノインデンテーション硬さ試験機〕	「ナノインデンテーション硬さ試験機」
1991	デンゲル 他 (ドイツ)	・荷重-圧子侵入深さ曲線から、弾性・塑性変形に基づくユニバーサル硬さ、塑性硬さ、流動・クリープ・(弾性)回復挙動等の評価手法を提案	「ユニバーサル硬さ」

3 | 我国における硬さ研究活動

図 3.1 には本調査研究テーマ「材料試験硬さ技術の系統化調査」の調査結果を総括するものとして、我国における硬さ試験機の技術開発とその変遷を、その時代背景や産業構造の変遷との関係も時系列でわかるように纏めた^{*1~10)}。第3章から第9章ではこれら調査内容の詳細を個々に報告する。

3.1 硬さ基準片製作標準作成委員会^{*1~4)}

以前の我国における硬さの研究は研究者と製造者が相互に行ってきたきらいがあるが、第2次大戦後の産業復興の過程で工業的立場から硬さ試験の信頼性を高めるためには関係者が協力し歩調を合わせることの必要性が強調され、その一環として1951年（昭和26年）4月に東京大学の吉澤武男教授が委員長となり、「硬さ基準片製作標準作成委員会」が発足した。この委員会は東京都立工業奨励館（橋本宇一館長）が通商産業省から研究補助金を得て設置したもので、① 硬さ基準片の製作基準、② 基準硬さの決定法、③ 基準片による試験機の精度検査法、④ 基準片の取扱基準等を策定するため、5年間にわたり研究調査が行われ、1956年（昭和31年）8月に最終的な“硬さ基準片製作標準（案）”を作成して解散した^{*4)}。

3.2 カタサ研究会、関西カタサ研究会、日本材料試験技術協会^{*1~9)}

上述の委員会活動が契機となり、1954年（昭和29年）11月に「関西カタサ研究会」が、1956年（昭和31年）10月に「カタサ研究会」（初代会長 吉澤武男）が発足、同志相集って研究・調査その他を行い、1973年（昭和48年）4月に「材料試験技術研究会」と名称変更して研究対象領域を“材料試験と検査技術”全般に拡大する時点で研究発表報告の総数は687編に達している。図3.2には、カタサ研究会の設立趣意書を示す。初回発行の会員名簿によれば、賛助会員12事業所、正会員44事業所（ユーザー26、メーカー18）が発足、事務所は東京都立工業奨励館に置かれた^{*4)}。材料試験技術研究会はその後1984年（昭和59年）4月に「日本材料試験技術研究会」、1985年（昭和60年）4月には「日本材料試験技術協会」と改名されたが、硬さ研究に関しては日本試験機工業会との連携で、現在まで一貫して、① 硬さ試験法・試験機・基準片の開発、② 硬さ（圧痕形成）メカニズムの解析、③

材料硬さデータベースの蓄積（機械特性との相関、硬さ換算表）、④ 標準化作業（JIS、ISO等の規格提案、原案策定、規格改定）等に取り組んでいる。また、材料試験の人材育成に関しては、早くからその重要性を認識し、1975年（昭和50年）から「硬さに関する講習会」を毎年、「金属材料技能検定に関する講習会」を隔年で実施し、1984年（昭和59年）からは東京都職業能力開発協会からの委託で「東京都金属材料試験技能検定実技試験」の実施も担当している^{*1~8)}。

ロール硬さ測定の研究は、1959年（昭和34年）に学識経験者、ロール製造会社、使用会社の有力メンバー（計21事業所）がカタサ研究会の一分科会として“ロール硬さ研究分科会”（現“ロール硬さ委員会”）を組織し、一段と活発に行われるようになった。それ以前はロール製造者と使用者間で測定値の食い違いが著しく、種々問題を惹起していたが、本活動により少なからず改善され、日本工業規格（JIS）のショア硬さ試験機・試験法・基準片の改定にも大いに寄与した。取り組んだ課題は、① ショア硬度計の精度とその改良、② 硬度計操作法の問題点、③ 硬さ基準片の測定とロールの表面硬さ測定値との関係、④ マスターロールの製作、⑤ 高硬度ショア硬さ基準片の製作と基準化、⑥ 実態調査の実施等であり、その内容はロール硬さ委員会資料に集録され、その報告総数は1986年（昭和61年）3月時点で545編に達している^{*4)}。

3.3 計量研究所、金属材料研究所

計量研究所（現 産業技術総合研究所）と金属材料研究所（現 物質・材料研究機構）はカタサ研究会の発足当初から賛助会員として硬さ研究に関与してきた。

物理量が中心である計量標準の設定と維持・供給の責任を負う当時の計量研究所において、工業量である硬さ標準の研究は異質であったともいえるが、国際度量衡委員会（CIPM）傘下の質量関連諮問委員会（CCM）に硬さのワーキンググループ（WGH）が設置されると世界の計量標準機関との国際比較が積極的に進められるようになり、ショアその他の標準硬さ試験機が開発された^{*10)}。また、国内的にもJCSS（Japan Calibration Service System）に基づくトレーサビリティ制度とその適合性評価方式が定着しつつある。

一方、金属材料の性能向上と信頼性確保、新材料開

西暦年 (元号年)	1900 年 ↓(明 33)	1920 年 ↓(大 9)	1940 年 ↓(昭 15)	1960 年 ↓(昭 35)	1980 年 ↓(昭 55)	2000 年 ↓(平 12)
	明治	大正	昭和			平成
時代背景	・日露戦争 ↓	・関東大震災 ・パリ出兵 ↓	・満州事変 ・金融恐慌 ↓	・第 2 次大戦 (開戦)(敗戦) ↓	・IMF 加盟 ・朝鮮戦争 ↓	・新幹線開業/東京リムパック ・ブラックマンデー ・EC 市場統合開始 ↓
産業構造 の変遷	軍需主導：殖産興業・富国強兵（戦時体制）			民需主導：戦後復興 → 高度成長 → バブル崩壊・平成不況 → グローバル化		
	[繊維工業の勃興] [工作機械・自動車工業の勃興] [鉄鋼・造船・化学工業の勃興]			[鉄鋼・造船・化学・電機・機械] [半導体・コンピュータ・OA/情報通信機器] ・産業構造の転換：内需主体 → 輸出拡大、“重厚長大” → “軽薄短小”		
産業分野 での硬さ 試験活用	(1) 金属材料の研究開発：金属組織（化学組成・塑性加工・熱処理）と硬さ、機械特性との相関 → 樹脂・セラミックスへの硬さ試験適用 (2) 製造工程での品質管理：[素材] [塑性加工部材] [メッキ・陽極酸化被膜部材] [表面硬化処理部材(浸炭、窒化、高周波焼入れ)] (非破壊的な測定手段) [機械加工・熱処理部材] [溶接・異材接合部材] [粉末焼結部材] [薄膜・微小部材(含. セラミックスコーティング)]					
硬さ試験 の研究	・振り子衝撃硬さ試験機 (考案：本多、佐藤) ↓	・松村式硬さ試験機 (シカゴ博覧会展示) ↓	[硬さ基準片製作標準作成委員会] ↓ JIS 規格制定		[材料試験技術研究会] ↓ [カタサ研究会／関西カタサ研究会]	[日本材料試験技術協会]
硬さ試験 機の開発・ 変遷	(1) ブリネル硬さ 《試験法考案》1900 年 ・スウェーデンの J. A. Brinell ↓ 《試験機輸入》 ・油圧式 ↓ 《国産化》 ・油圧式、てこ式 ↓ [携帯型] ↓ [試験機の高速度化] ↓ [基準硬さ試験機] ↓ [計測の自動化] (注) 画像処理、圧痕直径計測 ↓ [試験機の自動化] (注) 圧子押し込み深さ計測					
	(2) ショア硬さ 《試験法考案》1906 年 ・アメリカの A. Shore ↓ 《試験機輸入》 ・C 型、D 型スクリュー ↓ 《国産化》 ・C 型、D 型ショア硬度計 ↓ [産学官の連携] ・硬さ基準片製作標準 作成委員会の発足 ↓ [携帯型] ↓ [試験機の自動化] ↓ [ばね負荷、速度比計測] ・電子ショア硬度計 ↓ 《試験法考案》1975 年 ・スイスの D. Leeb ・エーチップ 硬度計					
	(3) ロックウェル硬さ 《試験法考案》1919 年 ・アメリカの S. Rockwell (実用化は C. Wilson) ↓ 《試験機輸入》 ・2 段てこ式ロックウェル、 ロックウェルスサーフィシャル 試験機 ↓ 《国産化》 ↓ 《試験機輸入》 ・1 段てこ式ロックウェル 試験機 ↓ 《国産化》 ↓ [各種硬さの関係表研究] ↓ [基準硬さ試験機] (注) ロックウェル、ビッカース兼用機 ↓ [携帯型] ↓ [試験機の自動化] ↓ [ジョミニ試験の自動化] (注) 鋼の焼入れ性評価					
	(4) ビッカース・ヌープ硬さ (ビッカース硬さ) (ヌープ 硬さ) 《試験法考案》1925 年 《試験法考案》1939 年 ・イギリスの R. Smith と G. Standland ・アメリカの F. Knoop ら ↓ 《試験機輸入》 ・アームストロング 型ビッカース試験機 ↓ 《国産化》 ↓ [基準硬さ試験機] ↓ 《試験機輸入》 ・ツークン硬度計(Tukon Tester) (注) ビッカース・ヌープ 試験機 ↓ [高温硬さ試験機] ↓ [基準硬さ試験機] ↓ [超微小硬度計] ↓ [計測の自動化] (注) 画像処理、 圧痕対角線 長さ計測					
	硬さ基準 片の開発 ・変遷	《基準片輸入》1922 年 ・輸入試験機付属の基準片 ↓	1939 年 ・国産化研究開始 ↓	《国産化》1952 年 ・基準片専門メーカー設立 ↓	・各硬さ基準片 本格生産 ↓	・イギリス NPL と 基準片モロリツ ↓
国際標準 化活動 (産業グロ ーバル化への 対応)	[国内標準：日本工業規格(JIS)] “ブリネル、ビッカース、ロックウェル、ショア、ヌープ 硬さ” ↓ 《JIS 規格化》1949 年 ・試験法、試験機 ↓ 《ISO/TC17 勧告規格》1960 年代末 ・試験法、試験機検査法、基準片校正 ↓ 《JIS 規格化》1964～1965 年 ・基準片 ↓ 《ISO/TC164/SC3 規格》現在 ・同左					

図3.1 我国における硬さ試験機の技術開発とその変遷(産業構造の変遷と材料試験硬さ技術)

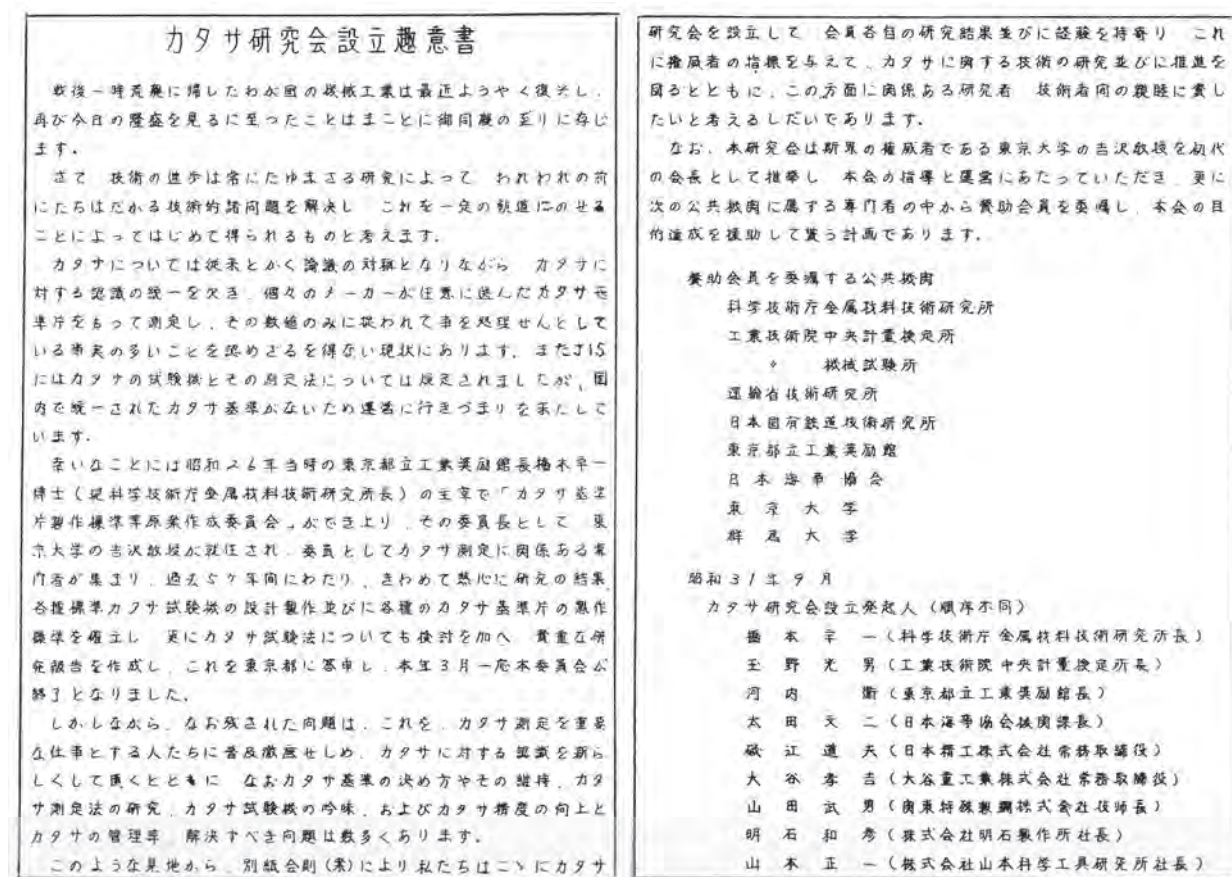


図3.2 カタサ研究会設立趣意書*4)

発を目的とする金属材料研究所は、材料評価の一手段として先進的な硬さ試験法・試験機の研究開発や材料データベースの蓄積を行ってきた。

[参考文献]

- * 1) (株) 山本科学工具研究社: “最近の硬さ研究資料一覧表” (Ⅰ. 硬さ基準片製作標準等作成委員会、Ⅱ. 硬さ研究会、Ⅲ. 関西硬さ研究会)、P. 1 ~ 54 (1964) [昭和 39 年]
- * 2) 編・執筆者 吉沢武男、執筆者 財満鎮雄、黒木剛司郎、町田周郎、寺沢正男、依田彦三郎、西畑三樹男、関谷三郎、山城貞男、山口章三郎: “硬さ試験法とその応用”、裳華房刊、P. 1 ~ 354 (1967) [昭和 42 年]
- * 3) 寺沢正男: “わが国のかたさの研究”、日本機械学会誌、Vol. 72、No. 600、P. 21 ~ 28 (1969) [昭和 44 年]
- * 4) 日本材料試験技術協会: 材料試験技術 “創立 30 周年 特別号” Vol. 31、No. 4、P. 241 ~ 292 (1986) [昭和 61 年]

- * 5) 日本材料試験技術協会: 材料試験技術 “創立 35 周年 特別号” Vol. 36、No. 4、P. 273 ~ 440 (1991) [平成 3 年]
- * 6) 日本材料試験技術協会: 材料試験技術 “創立 40 周年 特別号” Vol. 41、No. 4、P. 189 ~ 294 (1996) [平成 8 年]
- * 7) 日本材料試験技術協会: 創立 40 周年特別記念号 “硬さ、強さ、試験技術 40 年のあゆみ”、P. 1 ~ 185 (1996) [平成 8 年]
- * 8) 日本材料試験技術協会: 材料試験技術 “創立 50 周年 記念号” Vol. 51、No. 4、P. 227 ~ 248 (2006) [平成 18 年]
- * 9) 宮崎 勇、本庄 真: 「日本経済図説 (第 3 版)」、岩波新書、P. 1 ~ 23、61 ~ 82、163 ~ 188 (2001) [平成 13 年]
- * 10) 飯塚幸三: “硬さ測定をめぐる世界の活動の歴史的展望”、材料試験技術、Vol. 53、No. 2、P. 60 ~ 68 (2008) [平成 20 年]

4 | 日本工業規格 (JIS) にみる硬さ試験

[試験方法、試験機、硬さ基準片]

我国で初めて材料試験機の精度検査を取り上げたのは1922年(大正11年)、逓信省船舶試験所といわれており、1937年(昭和12年)に硬さ試験を含む船用品試験機規程が作られた。1941年(昭和16年)には日本機械学会に材料試験機規格制定委員会が設けられ、ブリネル、ビッカース、ロックウェル、ショアの各試験機規格案を策定し、1943年(昭和18年)に公表、これを原案に臨時JIS規格が制定された。1949年(昭和24年)の工業標準化法施行に伴い再検討されて日本工業規格(JIS)となり、試験方法規格も同時に制定され、1964～1965年(昭和39～40年)には硬さ基準片規格も定められた¹⁾。JIS規格は制定後も必要に応じ改定されているが、以下では最近の規格に基づき、これら試験方法・試験機の概要を紹介する。

4.1 ブリネル硬さ試験^{*1～3)}

[JIS Z 2243: 試験方法、JIS B 7724: 試験機]

(1) 考案者と硬さの定義

1900年にスウェーデンのブリネル(J. A. Brinell)が考案した試験方法で、球圧子を用い、試験面に球分のくぼみをつけた時の荷重を永久くぼみの直径から求めたくぼみの表面積で除した商を「ブリネル硬さ」と定義した。硬さ値は次式で算出するが、HBの数値には単位をつけない。

$$\begin{aligned} \text{HBW} &= 0.102 \times F/S = 0.102 \times F/\pi Dh = 0.102 \times F/\pi D^2 \times D/h \\ &= 0.102 \times 2F/\pi D^2 \times 1/[1 - \sqrt{1 - d^2/D^2}] \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、HBW:ブリネル硬さ(超硬合金球圧子)、F:加えた荷重(N)、S:くぼみの表面積(mm²)、 π :円周率、h:くぼみの深さ(mm)、D:球圧子の直径(mm)、d:くぼみの直径(mm)

ブリネル硬さは、定数×荷重条件(F/D^2)×くぼみ形状比 $[D/h$ または $1/(1 - \sqrt{1 - d^2/D^2})]$ の3要素で決まり、荷重条件(F/D^2)が同じならばくぼみ形状比(D/h)が硬さを決める。定数0.102で実質的にkgf/mm²単位にしている。ブリネル硬さでは弾性回復は無視し、荷重を除いた後の永久変形の状態にくぼみ直径を測定するが、その都度硬さを算出するのは極めて手数がかかるので、実際には種々のくぼみ直径に対して予め硬さ計算表が用意されている。

また、くぼみの深さでブリネル硬さを求める方法として次式がある。

$$\text{HBW} = 0.102 \times F/\pi Dh \quad (2)$$

ここで、F:荷重(N)、 π :円周率、D:圧子の直径(mm)、h:くぼみの深さ(mm)

(2) ブリネル硬さの特徴

くぼみの大きさは比較的大きく直径5～7mm程度になることもあり、広範囲の平均的な値が得られる。素材の受入検査や比較的不均一な試料(圧延材、鋳物等)の硬さ測定に適する。但し、超硬合金球圧子を用いても上限は650HBWと定められているので、工具のような硬い試料の硬さ測定には適さない。

(3) 試験機

試験機には油圧型とてこ型があり、簡便な油圧型が広く用いられている。一般には圧子径が5mmまたは10mmの球を用いて、3000、1000、750、500kgfの荷重を加えて硬さを測定する。3000kgfまでの圧縮荷重を加えることができるもので、十分な剛性をもつ安定強固な台上に据付けて使用する。荷重誤差は±1%以内で、荷重3000kgfを加えた時、荷重中心線上で測った機枠の変形が0.5mm以下となる剛性を要する。

(4) 圧子

多用されている圧子の球径は10mmで、小さくぼみ希望の場合は5、2.5、1mmの小径圧子もある(圧子直径の許容誤差は約±0.1%)。従来使用の焼入れ鋼球では試料のHB硬さ約350まで、超硬合金球ではそれ以上HBW硬さ650まで測定できる。

(5) くぼみ測定装置

一般に工場で使用しているものは直読式の接眼式計測顕微鏡で、くぼみ直径が5～6mm以内であれば十分測定できる(くぼみ直径を0.5%まで読取ることができ、目盛の許容誤差はくぼみ寸法に対し±0.5%)。

(6) 測定方法

実試験で用いられる硬さ記号、圧子直径、荷重条件、試験力の関係を表4.1に示す。本表の $0.102 F/D^2$ 値には、測定試料の材質と硬さにより、表4.2を適用する。現行JISでは荷重保持時間は10～15secで、くぼみの直径dと圧子の直径Dの比d/Dが0.24～0.6になるようにしている。

(7) 試料

試料表面は平面であることが原則で並行度は1%以内、試料厚さはくぼみ深さの8倍以上、隣同士のくぼみ間隔は中心間距離でくぼみ径の3倍以上、試料端部までのくぼみ距離は2.5倍以上と規定されている。

表4.1 ブリネル硬さ：硬さ記号、圧子直径、荷重条件、試験力の関係*³⁾

硬さ記号	圧子径 D	0.102 F/D ²	荷重（試験力） F
HBW10/3000	10mm	30	29.42 kN (3000kgf)
HBW10/1500		15	14.71 kN (1500kgf)
HBW10/1000		10	9.807 kN (1000kgf)
HBW10/500		5	4.903 kN (500kgf)
HBW10/250		2.5	2.452 kN (250kgf)
HBW10/100		1	0.9807 kN (100kgf)
HBW 5/750	5mm	30	7355 N (750kgf)
HBW 5/250		10	2452 N (250kgf)
HBW 5/125		5	1226 N (125kgf)
HBW 5/62.5		2.5	612.9 N (62.5kgf)
HBW 5/25		1	245.2 N (25kgf)

表4.2 ブリネル硬さ：材質と硬さによる0.102 F/D² 値の使い分け*³⁾

材 質	硬さ HBW	0.102 F/D ²
鋼、ニッケル合金、チタン合金		30
鋳鉄	<140	10
	≥ 140	30
銅 及び 銅合金	<35	5
	35～200	10
	>200	30
軽金属及びそれらの合金	<35	2.5
	35～80	5, 10, 15
	>80	10, 15
鉛、錫		1

4.2 ショア硬さ試験*^{1～3)}

[JIS Z 2246：試験方法、JIS B 7727：試験機]

(1) 考案者と硬さの定義

1906年にアメリカのショア（A. F. Shore）がショア硬さ試験機“スクレロスコープ”を考案、一定の高さから一定の形状と質量のダイヤモンドハンマーを鉛直に試験面に落下させた時の跳ね上り高さを硬さの尺度とする動的反発硬さ試験方法を提唱し、「ショア硬さ」と定義した。試験機の硬さ目盛は等分で、次式により硬さを算出する。JISでは、C型とD型の2機種が規定されている。

$$HS=k \times h/h_0 \quad (1)$$

ここで、HS：ショア硬さ、k：変換係数（C型：10000/65、D型：140）、

h_0 ：ハンマーの落下高さ、h：ハンマーの跳ね上り高さ

硬さ基準は、焼入れした高炭素鋼を試料とし、C型試験機を用いて254mm（10inch）の高さからハンマーを落下させた際、跳ね上り高さが165mm（6.5inch）になることからこれをショア硬さ100、跳ね上り高さ0で0とし、6.5inchを100等分して硬度を決めたといわれている。現在では硬さ100以上の材料が多々あるので、試験機目盛は140くらいまで設けられている。

(2) ショア硬さの特徴

ハンマーの跳ね上り高さを硬さ目盛として直接読取り、軟らかい金属から焼入鋼まで一つの尺度で測定、比較できる。試験機は安価、小型軽量で持ち運びができ、計測筒だけでも試験ができるので、試料受台に乗らない大形試料の測定が可能で、大型部品や圧延ロー

ルで多用されている。くぼみが浅く目立ちにくいので、製品測定にも適しているが、測定値は試験条件（試料への計測筒の押圧力、表面仕上げ状況、試料の質量・厚さ）に著しく左右されるので、測定値の信頼性を高めるためには基準片による試験機管理や測定値の補正が必要となる。

なお、ショア硬さ試験では試料面に深さ0.01～0.05mmほどの極めて小さい傷をつけるが、落下時の位置エネルギーの大半は試料との衝突で弾性エネルギーとなり、ハンマーを跳ね上げる。材料の弾性エネルギーは材料の弾性限の2乗に比例し弾性率に反比例するので、弾性率のほぼ同一材料ではショア硬さを比較できるが、著しく異なると比較できない（例えば、消しゴムは鋳鉄よりも硬いということになる）*³⁾。

(3) 試験機

機枠は試料を乗せる受台と計測筒を上下させる腕部で構成され、20kg付近までは機枠質量が大きくなるほど実測値は高くなるが、持ち運びや従来の慣習も勘案し、全質量は8～8.5kgに規定されている（受台質量は4kg）。受台は平面で、直径40mmの円形、当り面ショア硬さ70以上の鍛鋼または圧延鋼材製で、腕部は原則として試料受台と別個に製作し、受台に取付ける構造とする。

C型計測筒には内径約6mmのガラス管表面に硬さ目盛があり、この中に先端が球状のダイヤモンド圧子を取付けた約20mm長のハンマー（円筒形の打撃体）が入っている。このガラス管中を落下するハンマーの跳ね上り高さ（硬さ）を目測で瞬間的に読取る。D型に比べハンマーの質量が小さく、試料の質量による硬

さ値の変化は少ないが、目測による読みに熟練を要する（圧延ロールの硬さ測定で賞用）。

一方、D型計測筒のハンマーは直径8mmの円筒形鋼製で、先端にダイヤモンド圧子が取付けられている。ハンマー端がダイヤルゲージのスピンドルを押上げ、ハンマーの跳ね上り高さに応じた値をダイヤルゲージ指針が示すのでC型より取扱いが簡単で、利用率はD型が圧倒的に多い（ダイヤルゲージの1目盛が1硬度で、跳ね上り高さ約0.14mmに相当）。

（4）圧子

ショア硬さはショア社の基準片で硬さが決められていると考えてよいが、そのばらつきが大きい等の諸問題を生じ、国内で試験機も基準片も製作するようになった。JISにはショア圧子の形状や寸法に関する記述（形状・寸法の交差指示）はないが、常識的な考え方として先端はほぼ球形で、ショア硬さに用いる数種類の硬さ基準片があり、これを用いて硬さを測定し、基準片の値と試験機の指示値で誤差があれば校正する（誤差の分だけ差し引く真値を知るか、圧子を修正して真の硬さが求まるようにしてもよい）。

圧子の修正方法は“ともずり（ランダムポリッシュ）”といい、鋳鉄板や銅板上でハンマーを回しながら、基準片の値に合うように、油を混ぜたダイヤモンド粉末により研ぎ上げる（曲率半径が小さくなると跳ね上り高さが小さくなり、大きくなると高く跳ね上がる）^{＊3)}。ハンマーへのダイヤモンド取付け方法には物理的固定、ロウ付け（高温接着）等があるが、硬さ精度上、繰返し試験で衝撃を加えても常に密着していることが重要である。

（5）目盛

目盛の正確さについては基準片に依存しているのが実状で、30～95HSの範囲で5種類（30、50、60、80、90）を標準とする。計5回の測定値から平均値を求め、基準片硬さとの差は全ての硬さで1.5以下でなければならない。

（6）測定方法

C型ではハンマーの跳ね上り高さを、D型では指針の指す目盛を0.5単位で読取り、5回の測定でその平均値を整数で表す。硬さは、硬さ値、硬さ記号の順に表示する。計測筒だけをはずして手持ちまたは特殊支持台で使用した場合は、測定結果に手持ち測定または支持台測定であることを付記する。

（7）試料

試料の厚さや質量がショア硬さに影響する。試料を機枠の試料受台上に押さえつける力が20kg以上、またD型では鉄鋼試料で厚さ約5mm以上、非鉄試料で

は厚さ約2mm以上あればよいといわれている（試料はなるべく重い方がよく、0.1kg以上必要）。表面粗さが大きいと硬さ値は低下し、裏面も同じ傾向を示すので、表面粗さは50HS未満で1.6a、50HS以上で0.8aとすることが望ましい。試料や計測筒が傾いていると硬さは低くなるので、傾きは1°以下とし、くぼみ間隔は中心距離で1mm以上離す必要がある。D型ショア硬さでは試料端部で中央部に比べ硬さ値が低下する“端面効果”が顕著に生じ、硬さが低いものほど大きいので、基準片でも端部より7mm以上内側に入ったところで硬さを測定する。

4.3 ロックウェル硬さ試験^{＊1～3)}

〔JIS Z 2245：試験方法、JIS B 7726：試験機〕

（1）考案者と硬さの定義

1919年、アメリカのロックウェル（S. Rockwell）が考案し、ウィルソン（C. Wilson）が実用化した。ダイヤモンド円錐圧子または鋼球圧子を用いて、最初に基準荷重を加え、次に試験荷重を加え、再び基準荷重に戻した時、この前後2回の基準荷重における圧子侵入深さの差をダイヤルゲージ等で求め、次式で算出したものを「ロックウェル硬さ」と定義した。基準荷重が10kgfの時は“ロックウェル硬さ”、3kgfの時は“ロックウェルスーパーフィシャル硬さ”と称し、荷重の大小で区別しているが考え方は同じである。なお、ロックウェルスーパーフィシャル硬さは、表面硬化処理鋼の硬化層硬さを測定する目的で考案された。

① ロックウェル硬さ

$$HR\alpha = 100 - 500h \text{ [ダイヤモンド円錐圧子]} \quad (1)$$

$$HR\beta = 130 - 500h \text{ [鋼球圧子]} \quad (2)$$

② ロックウェルスーパーフィシャル硬さ

$$HR\gamma = 100 - 1000h \quad (3)$$

ここで、h：くぼみ深さの差(mm)

ロックウェル硬さはある一定値から差し引いた数値を硬さと定めているので、硬さ値は硬さの比例の関係で表示されない。ロックウェル硬さの欠点は、硬いものほど感度が悪く、軟らかいもので過大な感度を示すことにある。なお、ロックウェル硬さ試験では最初に基準荷重をかけてから測定段階に入るので、試料表面の状況のある程度無視できる利点がある。

《参考》^{＊3)}

ロックウェル硬さを発想したルーツは「ルドウィック硬さ試験法」にある。本試験法は1908年にルドウィックが考案、円錐圧子の押込みではなくくぼみは常に相似形で変形に対する比例則が成り立ち、硬さは荷重

に無関係であることを発表した。その圧子頂角は 90° で、荷重をくぼみの傾斜面積で除した値を硬さと定義し、荷重が小さい時は圧子先端形状の影響が大きいので、最初にある小荷重をかけた後、試験荷重をかける考え方を提唱している。

(2) 特徴

ロックウェル硬さ試験ではくぼみ深さを測り硬さ値とするので、試験機付属の指示計で直接硬さを読取ることができる。試験所要時間が短いことから、現場での工程中間検査、部品、工具等 広範囲の検査に多用され、また、測定量の電気的変換が容易なことから測定の自動化も比較的早くから行われている。

但し、硬さの尺度（スケール）の種類が多く、一つのスケールで測定できる硬さ範囲に制限がある。広範囲の硬さ測定では、使用圧子の荷重組合せを変えて異なるスケールで硬さ測定されるので、測定値にスケール記号を付けることが必須で、硬さ基準片による試験機管理や測定値補正が必要とされる。ロックウェルスーパーフィシャル硬さは、通常のロックウェル硬さ試験で不可能な薄物や小物試料の硬さ測定に適する。

(3) 試験機

機枠や試料支持装置は最大負荷でも測定上十分な剛性を持ち、試料受面は圧子取付け軸の中心線に直角な平面とする。基準荷重、試験荷重、基準荷重と荷重変化させた時、前後2回の基準荷重での機枠と試料支持装置の荷重方向変形量の許容差値は硬さで $\pm 0.5\text{HR}$ と規定されている。

(4) 圧子

ダイヤモンド圧子は円錐形（円錐角度 $120 \pm 0.35^\circ$ ）で、曲率半径 $0.2 \pm 0.01\text{mm}$ の先端球面部（頂点）と円錐部が滑らかに接続された曲面にする。球圧子には、直径が $1.5875 \pm 0.0035\text{mm}$ または $3.175 \pm 0.004\text{mm}$ の鋼球、または超硬合金球を用いる。

(5) 硬さ指示装置

圧子移動量をダイヤルゲージで読むものが一般的で、デジタルのものもある。目盛盤の1目盛はロックウェルで $2\mu\text{m}$ 、スーパーフィシャルで $1\mu\text{m}$ 、許容誤差は $\pm 0.5\text{HR}$ で、指針が指示する硬さ目盛を0.2以下まで読取る。

(6) 測定方法

2種類の硬さ試験機には、スケールと称して、圧子の種類、試験荷重及び硬さ算出式の組合せに固有の硬さ記号を設けている[表4.3 参照]。硬さは、硬さ値、硬さ記号の順に表示する。硬さ約60HRCの試料でC硬さ試験を行う時には、試験荷重負荷時の圧子押込み所要時間は2～3secとする（荷重保持時間は4±

2sec）。

(7) 試料

試料の試験面と裏面は平行な平面であることが原則ではあるが、ISOでは、円柱試料の直径が小さい場合でも適当な測定値補正を行えば曲面を測定してもよいとされている[ISO 6508]。また、試料厚さはくぼみ深さの10倍以上（ダイヤモンド圧子）または15倍以上（鋼球圧子）、隣同士のくぼみ間隔は中心間距離でくぼみ径の4倍以上、試料端部までのくぼみ距離は2.5倍以上と規定されている。

4.4 微小硬さ試験

4.4.1 ビッカース硬さ試験^{*1~3)}

[JIS Z 2244：試験方法、JIS B 7725：試験機]

(1) 考案者と硬さの定義

1925年にイギリスのスミス（R. Smith）とスタンランド（G. Standland）が考案し、研究用に利用されたが、その後一般に広く利用されるようになった。対面角が 136° のダイヤモンド正四角錐圧子を用い、試験面にくぼみをつけた時の試験荷重を、永久くぼみの対角線長さから求めた表面積で除した商を「ビッカース硬さ」と定義した。硬さ値は次式で算出する。但し、HVの数値には単位をつけない。

$$HV=0.102 \times F/S=0.102 \times 2F \sin(\theta/2)/d^2=0.1891 \times F/d^2 \quad (1)$$

ここで、HV：ビッカース硬さ、F：試験荷重(N)、S：くぼみの表面積(mm^2)、d：くぼみの対角線長さの平均(mm)、 θ ：ダイヤモンド圧子の対面角(136°)

(1)式では、定数0.102により、実質的に kgf/mm^2 単位にしている。また、ビッカース硬さでは、ブリネル硬さと一致させる考え方から、ブリネル硬さにおける d/D [d：くぼみの直径、D：球圧子の直径]の平均値0.375に該当する円の接線間の角度と同じ 136° の対面角をもつピラミッド（四角錐）圧子を採用しているので、鉄鋼材料の場合、ビッカース硬さはブリネル硬さの5～6%増の値となる。実際には、対角線長さと試験荷重からJIS等にある算出表を用いて硬さを求める。

(2) ビッカース硬さの特徴

ブリネル硬さは球圧子の大きさが一定の場合、荷重が大きくなるに伴い放物線的に増加するが、ビッカース硬さでは、均質な材料に対しては加える荷重の大小とは無関係に一定の硬さで求めることができる（押込み深さが異なってもくぼみは常に相似形）。したがって、硬い材料から軟らかい材料まで単一の硬さ尺度で試験ができ、また、軟らかい材料には軽荷重で硬い材

表 4. 3 ロックウェル、スーパーフィシャル硬さ：スケール名称と圧子、試験荷重、硬さ算出式*1)

	基準荷重	スケール	圧子	試験荷重	硬さ算出式	用途例
ロックウェル硬さ	98.07N (10kgf)	C	ダイヤモンド円錐圧子 ・頂角 120° ・先端半径 0.2mm	1471 N (150kgf)	100—500h	・B スケール 100 以上の硬い材料で C70 以下のもの(深い肌焼鋼)
		D		980.7N (100kgf)		・C スケールよりやや軽荷重用(浅い か中位の肌焼鋼)
		A		588.4N (60kgf)		・超硬合金、薄鋼板、浸炭鋼等(浅い 肌焼鋼)
		G	鋼球圧子 ・直径 1.5875mm (1/16 inch)	1471 N (150kgf)	130—500h	・B スケールより硬い材料
		B		980.7N (100kgf)		・焼なまし鋼等
		F		588.4N (60kgf)		・軸受メタル、焼きなまし黄銅、銅、 薄板
		K		1471 N (150kgf)		・E スケールより硬い材料
		E	鋼球圧子 ・直径 3.175mm (1/8 inch)	980.7N (100kgf)		・非常に軟らかい材料(ホワイトメタル等)、 極薄い材料
		H		588.4N (60kgf)		
スーパーフィシャル硬さ	29.42N (3kgf)	45N	ダイヤモンド円錐圧子 ・頂角 120° ・先端半径 0.2mm	441.3N (45kgf)	100—1000h	・窒化鋼 または 硬い材料の薄板等
		30N		294.2N (30kgf)		
		15N		147.1N (15kgf)		
		45T	鋼球圧子 ・直径 1.5875mm (1/16 inch)	441.3N (45kgf)		・鋼、黄銅、青銅の薄板等
		30T		294.2N (30kgf)		
		15T		147.1N (15kgf)		

料には高荷重で行っても、硬さは同一尺度で求められる。通常、くぼみ対角線長さ $5\mu\text{m} \sim 1\text{mm}$ の広い範囲で使われる。くぼみは極小さい(くぼみ深さは対角線長さの 1/7) ので、試験箇所の表面状態がよければ製品の硬さ測定も可能で、小物試料、薄物試料、微小部分の硬さを測ることができる(針の先端、アルミ箔、ねじ山、めっき層や硬化層、金属組織等)。

(3) 試験機

試験荷重が 1kgf 以上のものと以下のものが主であるが、両方にまたがるものもある。試験機は十分に安定性のある強固な基礎台に据付け、圧子取付け軸を垂直に置いて使用する。荷重負荷には、荷重用てこの一端を支点とし、他端に重錘を吊るし、支点近くに圧子を押しバーを設けている。また、圧子の急降下を防止し、負荷速度を調整(圧子の試料面接触を徐々にいき、所定時間荷重保持、除荷)するため、カムやダッシュポットの機構を取付けている。

(4) 圧子

圧子の対面角は $136 \pm 0.5^\circ$ 、先端の稜線の許容値

は試験荷重 5kgf 以上で $2\mu\text{m}$ 、0.2kgf 以上 5kgf 未満で $1\mu\text{m}$ 、10gf 以上 0.2kgf 未満で $0.5\mu\text{m}$ 、ピラミッドの 4 面は垂直軸に対し等角となるべきではあるが傾いても 0.5° 以内と規定されている(本来、四角錐の頂点は点となるべきではあるが、実際は加工上、どうしても稜ができる)。

(5) くぼみ測定装置

くぼみの対角線長さを試験機付属の計測顕微鏡で測定する。対角線長さの 0.5% または $0.2\mu\text{m}$ のうち、いずれか大きい値まで読取る。

(6) 測定方法

対角線長さの読み取り精度上、できるだけ大きなくぼみ(試験荷重)が望ましいが、くぼみが顕微鏡視野に対して大きすぎると顕微鏡の収差が測定値に影響するので、顕微鏡視野の 70% 以内の大きさで測定するのがよいとされている。しかし、微小硬さ試験機では、試料の厚みや試験面の広さ等を考慮して 20% 以下のくぼみになる場合も多い。試験荷重の保持時間は 10 ~ 15sec が標準で、硬さ値は有効数字 3 桁で硬さ記号

を付けて表示する。表 4.4 には硬さ記号と荷重との対応を示す。

(7) 試料

ビッカース硬さのくぼみはブリネル硬さのそれに比べはるかに小さいので、製品や小さな試料で硬さ測定ができる。但し、くぼみが小さいので試料表面を鏡面仕上げしなければならない。試料面は圧子の移動方向に直角、試料厚さはくぼみ対角線長さの 1.5 倍以上であることが必要で、隣同士のくぼみ間隔や試料端部までのくぼみ距離は材料によりやや異なる〔表 4.5 参照〕。

《参考 1》“微小硬さ”の対象^{*3)}

日本では慣例的に 1kgf 以下の荷重によるビッカース硬さ、ヨーロッパでは 0.2kgf 未満の荷重によるビッカース硬さ、アメリカでは荷重範囲 1 ~ 1000gf でのビッカース硬さとヌープ硬さ〔ASTM E 384〕を称している。

《参考 2》曲面計測時の硬さ値補正^{*1)}

ビッカース硬さ試験では、製品の表面部分にそのままの状態でくぼみをつけることが多く、試験面は凸面、凹面、円柱面、球面等 曲面のまま測定することもある。一般的に、円柱面や球面で測定したビッカース硬さは高めに測定され、くぼみ対角線長さ d と試料直径 D との比 d/D が大きいほど、より高めに測定される。このような測定値の修正には、ISO の修正係数〔ISO 6407-1〕を乗ずる。

《参考 3》実際のビッカース圧痕形状^{*3)}

正四角錐ダイヤモンド圧子で作られたくぼみは、本来 正方形で 4 辺は直線になるべきであるが、実際のくぼみの辺の形は 材質、加工の程度、熱処理条件その他に左右される。一般には、正方形の辺の部分が外側にふくらんだ“樽形”と、逆に内側にへこんだ“糸巻形”に大別され、これらは残留応力、結晶方位、弾性回復等に起因するといわれている。

- ① 樽形：くぼみ周縁部が盛り上がる。〔例〕焼なました鉄鋼材料、冷間加工した非鉄材料
- ② 糸巻形：くぼみ周縁部がだれ込んで沈降する。〔例〕硬化した鉄鋼材料、焼なました非鉄材料

4.4.2 ヌープ硬さ試験^{*1~3)}

〔JIS Z 2251：試験方法、JIS B 7734：試験機〕

(1) 考案者と硬さの定義

1939 年にアメリカ NBS のヌープ (F. Knoop) が考案した試験方法で、対稜角が 172.5° と 130° で、断面が菱形のダイヤモンド四角錐を用い、試験面にくぼみを

つけた時の試験荷重を、永久くぼみの長い方の対角線長さから求めた投影面積で除した商を「ヌープ硬さ」と定義した。硬さ値は次式で算出する。

$$HK=0.102 \times F/A=0.102 \times F/c \cdot d^2=1.451 \times F/d^2 \quad (2)$$

ここで、HK：ヌープ硬さ、F：試験荷重(N)、A：くぼみの投影面積(mm²)、c：d から A を求めるための圧子定数、d：くぼみの長い方の対角線長さ(mm)

ビッカースとヌープは圧子形状が異なるだけでなく、ビッカースは永久くぼみの表面積を、ヌープは永久くぼみの投影面積を硬さ算定に用いている。ビッカース硬さのくぼみに比べ長手対角線長さは約 3 倍、くぼみ深さは約 1/2 で、ヌープ硬さの方が試料の表面状態をより鋭敏に表す(くぼみ対角線長さは 7.11:1)。

(2) ヌープ硬さの特徴

同一荷重に対してビッカース圧子よりもくぼみ深さが小さく(長い方の対角線長さの 1/30.5)、対角線長さが長いので硬さ変化に対して敏感で、ビッカースよりも薄層の硬さ分布をより細かく測定できる。また、4 方向に対称でなくくぼみができることがあり、材料の異方性を調べるのに利点がある。結晶内部、周縁部、粒界等の硬さを測定することで金属材料研究の一助に広く利用され、工業面ではめっきの硬さや厚さ、刃物の刃先硬さ、針や時計等の微小部品の硬さ、箔の硬さまで広範囲の用途がある。くぼみ長手方向端部の塑性変形量が少ないので、脆い材料(ガラス等)の硬さ測定にも適している。

(3) 試験機

ビッカース硬さ試験機と共用できる構造の微小硬さ試験機を用いる(圧子を交換するだけでビッカース硬さとヌープ硬さの試験可)。試験荷重は 1kgf 以下、試験荷重の許容誤差は 200gf 未満で $\pm 1.5\%$ 、これ以上で $\pm 1.0\%$ と規定されている。

(4) 圧子

断面積菱形(第 1 の対稜角が $172.5 \pm 0.1^\circ$ 、第 2 の対稜角が $130 \pm 0.1^\circ$)の四角錐ダイヤモンドで、先端の稜線長さは $1 \mu\text{m}$ 以下と規定されている。

(5) くぼみ測定装置

計測顕微鏡は試験機本体に組み込まれ、負荷機構の圧子部と計測顕微鏡の対物レンズがタレット式に切り換えられる装置が主流で、倍率 400 ~ 600 倍が多用されている。計測顕微鏡の目盛許容誤差は、測定長さ d が $40 \mu\text{m}$ 以上で $\pm 0.4 \mu\text{m}$ 、これ未満で $\pm 0.01d$ 以内と規定されている。

(6) 測定方法

荷重保持時間は 10 ~ 15sec が標準で、硬さ値は有効数字 3 桁で、硬さ記号を付けて表示する。表 4.6 に

は硬さ記号と荷重との対応を示す。

(7) 試料

浸炭層、窒化層、めっき層等の非常に薄いものや、非鉄金属の軟らかい単結晶等、特殊な用途では試験荷重を極端に小さくする必要がある。その際、試料の表面仕上げ、結晶粒子とくぼみの大きさ、表面研磨時の加工変質層等への考慮が重要となる（加工硬化層の除去には電解研磨か化学研磨が有効）。試料厚さは長い方の対角線長さの0.3倍以上が必要で、隣同士のくぼみ間隔や試料端部までのくぼみ距離は材料によりやや異なる〔表4.7 参照〕。

[参考文献]

* 1) 今津好昭：“硬さ試験方法および試験機”、日本

材料試験技術協会「現場の硬さ試験」講習会テキスト、P. 2-1 ~ 2-37 (2007) [平成 19 年]

* 2) 日本材料試験技術協会編：“JIS 硬さ試験関係規格集”、日本材料試験技術協会「現場の硬さ試験」講習会テキスト、P. 1 ~ 205 (2007) [平成 19 年]

* 3) 寺沢正男、岩崎昌三 共著：「硬さのおはなし（改訂版）」、日本規格協会刊、P. 1 ~ 214 (2001) [平成 13 年]

[注]

1) 寺沢正男：“わが国のかたさの研究”、日本機械学会誌、Vol. 72、No. 600、P. 21 ~ 28 (1969) [昭和 44 年]

表4.4 ビッカース硬さ：硬さ記号と試験荷重との対応*³⁾

硬さ記号	荷重	硬さ記号	荷重	硬さ記号	荷重
HV0.01	0.09807N (10gf)	HV0.3	2.942N (0.3kgf)	HV 10	98.07N (10kgf)
HV0.02	0.1961N (20gf)	HV0.5	4.903N (0.5kgf)	HV 20	196.1N (20kgf)
HV0.03	0.2942N (30gf)	HV 1	9.807N (1kgf)	HV 30	294.2N (30kgf)
HV0.05	0.4903N (50gf)	HV 2	19.61N (2kgf)	HV 50	490.3N (50kgf)
HV0.1	0.9807N (0.1kgf)	HV 3	29.42N (3kgf)	HV100	980.7N (100kgf)
HV0.2	1.961N (0.2kgf)	HV 4	49.03N (4kgf)		

(注) JIS、ISO、ASTM 規格とも硬さ記号は HV_{xxx} で表示 (xxx は荷重を kgf に戻した数値)

表4.5 ビッカース硬さ：試料材質とくぼみ間隔、端部までのくぼみ距離*¹⁾

試料の材質	鋼・銅及び銅合金	軽金属・鉛・錫及びその合金
くぼみ中心間の距離	3d 以上	6d 以上
くぼみ中心から縁までの距離	2.5d 以上	3d 以上

(注) d：くぼみの対角線長さ

表4.6 ヌーブ硬さ：硬さ記号と試験荷重との対応*³⁾

硬さ記号	荷重	硬さ記号	荷重	硬さ記号	荷重
HK0.01	0.09807N (10gf)	HK0.05	0.4903N (50gf)	HK 0.3	2.942N (0.3kgf)
HK0.02	0.1961N (20gf)	HK 0.1	0.9807N (0.1kgf)	HK 0.5	4.903N (0.5kgf)
HK0.03	0.2942N (30gf)	HK 0.2	1.961N (0.2kgf)	HK 1	9.807N (1kgf)

表4.7 ヌーブ硬さ：試料材質とくぼみ間隔、端部までのくぼみ間隔*¹⁾

対角線の方向	短い方		長い方(参考)
試料の材質	鋼・銅及び銅合金	軽金属・鉛・錫及びその合金	—
くぼみ中心間の距離	2ds 以上	6ds 以上	2dl 以上
くぼみ中心から縁までの距離	2.5ds 以上	3ds 以上	1.5dl 以上

(注) ds：短い方の対角線長さ、dl：長い方の対角線長さ

5 | 硬さ試験機の開発、技術の変遷*^{1~4)}

硬さ試験方法とそれを実現する試験機は元来、金属材料の専門家により材料開発や材料特性改善の研究を行う目的で必要に迫られて考案されたものが多く、その起源はいずれも19世紀末から20世紀初頭の欧米諸国にある。我国に硬さ試験機がいつ頃初めて輸入されたかは定かでないが、早くても明治後期から大正初期と思われる。陸海軍の技術研究所、工廠、造兵廠、官公立研究機関や当時 材料力学、金相学の分野で多くの実績を残した九州帝大（小野鑑正教授）、京都帝大（松村鶴造教授）、東京帝大（湯浅亀一教授）、東北帝大（本多光太郎教授）等の研究室に欧米諸国のオリジナルメーカーから各種材料試験機とともに研究用として輸入されたことは間違いない。1930年代半ば（昭和10年代）に入ると戦時色も強まり、陸海軍や軍需工場向けの需要が高まり、この頃には硬さ試験機本体を製造する（株）東京衡機製造所や（株）明石製作所等、ダイヤモンド圧子・ハンマーを製造する（株）東京ダイヤモンド工具製作所等の先発メーカーから独立創業するものも数多く出てきた。しかし、急発展した試験機工業も第2次大戦末期の戦火でほとんどの工場が灰塵に帰し、敗戦で試験機工業もダイヤモンド工具工業ともども壊滅してしまった。戦後は1950年（昭和25年）6月 朝鮮動乱の勃発で米軍特需を受け、日本の各種製造業の始動に伴い試験機工業、ダイヤモンド工具工業の業界も次第に活気を取り戻していった。戦前よりも戦後しばらくは全く欧米諸国の後塵を拝していた我国の硬さ試験機関連の技術は、その後の民生用産業機器の急激な需要拡大のもと、我国工業製品の強度信頼性向上を望む多くの人々のたゆまぬ努力により1980年代半ば（昭和60年代）には世界のトップレベルへと長足の進歩を遂げ、硬さ試験は各種素材・機器の製造時にその品質管理手段としても広く利用されるようになってきた。また この頃には、海外メーカーとの技術提携や（株）明石製作所のように現地法人設立（アメリカ）や微小硬度計製造工場の海外進出（韓国）等がみられるようになり、我国の優れた硬さ試験機は、アメリカ、台湾、韓国をはじめ、アセアン、ヨーロッパ諸国やブラジル、チリ等 世界の隅々にまで販路を広げ、総生産額に占める輸出比率も大幅に伸びるに至った¹⁾。

材料の硬さ測定では、圧子やハンマーで静的または動的に変形を与え、材料が示す塑性流動過程の抵抗度合いを測定し、硬軟の序列数を決めているが、第2章

で述べたように、今日までに考案された硬さ試験機の種類はきわめて多く、それぞれの試験法により特有な硬さ値となっている。以下では、歴史のふりいにかけて残り現在も産業界で多用されているJIS規格対象の4種類の試験機、つまり、ブリネル、ショア、ロックウェル、ビッカース（含. ヌーブ）の各硬さ試験機、とその延長上で産業界の更なるニーズに対応すべく進化を遂げつつある高温硬さ試験機、携帯型硬さ試験機、超微小硬さ試験機について、また、硬さ基準片に付せられる基準値を得るための“基準硬さ試験機”についても、その開発と変遷の過程を調査し、取り纏めた。なお、各試験機ともその基本構成は、① 試験機本体：負荷装置と試料支持台、② 圧子、ハンマー：試料に塑性変形を与える部品、③ 計測部分：圧子のくぼみ計測またはハンマーの反発高さ測定、からなる。この中で、ショア、ロックウェル、ビッカース（含. ヌーブ）、超微小硬さ試験機のキー技術の一つにダイヤモンド圧子・ハンマーの高精度加工技術があるが、その製作はダイヤモンド工具メーカーが担当しており、これについては第6章で述べる。また、硬さ試験機の間接的な精度保証や日常管理は硬さ基準片による硬さ値検定で行われているが、基準片の開発・製造とその変遷については、第7章に取り纏めた*^{1~4)}。

5.1 ブリネル硬さ試験機*¹⁾

図5.1-1には、我国におけるブリネル硬さ試験機の開発・変遷の概略が時系列でわかるように纏めた。ブリネル硬さ試験機は1900年（明治33年）にJ. A. Brinellが考案したもので、その際、10mm径の鋼球圧子に最大3000kgf（29.42kN）の試験力を負荷するのにてこ式を採用した。しかし、この方式は試験機寸法が大きく、3000kgf以外の試験力をかけるときは大きな重錘の上げ下げに労力を要し、作業現場では試験機と重錘の小型・計量化が求められた。“油圧式”は“てこ式”の不満を解消すべく開発されたものである²⁾。

1922年（大正11年）にアメリカ オルゼン（Olson）社製の“油圧式ブリネル硬さ試験機”[図5.1-2 参照]が東京府立商工奨励館に輸入・設置され、その翌年頃にはこれをモデルに国産化されている。図5.1-3には第2次大戦後に製造された（株）島津製作所[製造：1969年（昭和44年）]と（株）富士試験機製作所[製造：1965年（昭和40年）]の“オルゼン型油圧式ブ

リネル硬さ試験機”を示す。島津製作所では1931年(昭和6年)にオルゼン型試験機の製造を開始している。なお、主流は油圧式ではあるが、測定精度を最重要視するユーザーはてこ式を採用する傾向がある。図5.1-4には、(株)東京衡機製造所と(有)今井試験機の“てこ式ブリネル硬さ試験機”を示す。

4.1章で述べたように、ブリネル硬さの定義では試料に作られたくぼみ直径を除荷後に測定して硬さ値を求める。しかし、この方法では製造工程で材料検査を実施する際に手数がかり、くぼみ測定時の個人差も測定値に混入する。図5.1-5に示した(株)東京衡機製造所の高速ブリネル硬さ試験機(油圧式、荷重3000kgf)は、同一形状部品の連続硬さ測定用に開発されたもので、荷重の負荷・除荷は足元のペダルレバーで操作、ゴーガンナンバー用ダイヤル式指示計を装着すれば荷重が1500kgfからダイヤルゲージが作動し荷重3000kgfに達するとその圧痕深さの差を指示し、直にブリネル硬さに換算することができる³⁾。

図5.1-6には、(株)井谷衡機製作所が開発した全自動デジタル式ブリネル硬さ試験機(IDB型)を示す。この試験機では計測部荷重軸と鋼球の間に荷重検出用ロードセルと深さ検出用差動トランス式深さゲージを配し、荷重軸を油圧シリンダーで駆動する。試験荷重は、設定値の前段でコンパレータが作動し、油圧シリンダーの荷重速度を高速から低速に切替え設定値で停止する。荷重保持時間と演算はプログラム設定に従っ

て行われ、荷重値はロードセルの出力電圧から増幅器を介してデジタル表示、深さ値は深さゲージの出力電圧から増幅器を介してA-D変換器でデジタル量に変換した後くぼみ表面積に換算する。その後、荷重値をくぼみ表面積で除したブリネル硬さ値がくぼみ直径とともにデジタル表示される⁴⁾。

図5.1-7は(株)明石製作所が開発した自動ブリネル硬さ試験機で、この試験機と試料ハンドリング装置、マーキング装置(不良品にマーク)、データ処理装置、制御装置等からなるシステムとして生産ラインに組み込まれたものである。試験荷重の負荷前後における試料の姿勢変化を極力少なくするため、試料クランプ力1700kgfと予備荷重300kgfの計2000kgfが試料に加わった負荷状態を圧子変位基準としている。また、変位計測は押付け筒と圧子の相対変位を測定する方式とし、試料裏面のつぶれや機枠変形の影響を極力少なくしている。荷重は2枚の板ばねで負荷、下側の板ばね下面にロードセルを取付け、測定動作と荷重制御は測定面検出器、ロードセルの出力、測定部の上昇戻り位置確認スイッチで制御する構造となっている⁵⁾。

なお、近年になって、CCDカメラで圧痕形状データを取り込み高速画像処理で圧痕直径を測定しブリネル硬さを算定する携帯型の圧痕読取装置も開発されるようになったが²⁾、これについては5.6章で述べる。

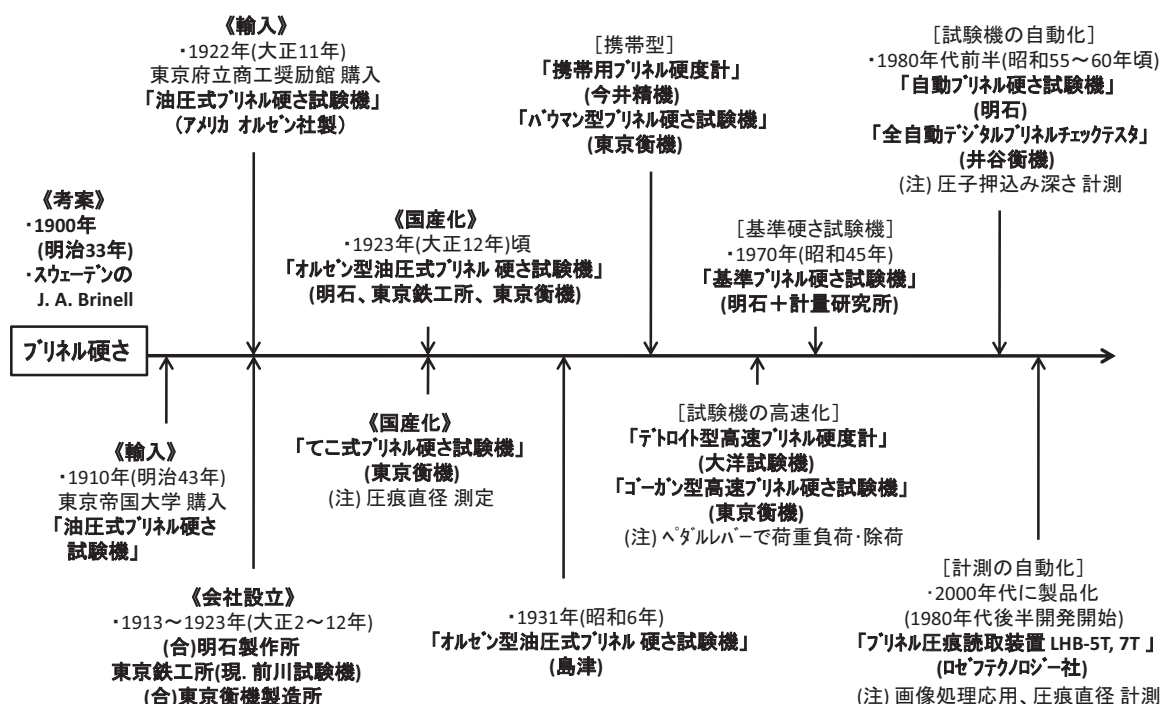


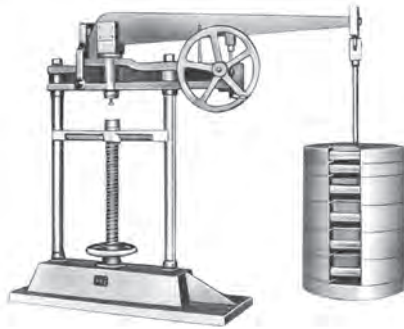
図5.1-1 ブリネル硬さ試験機の開発と変遷



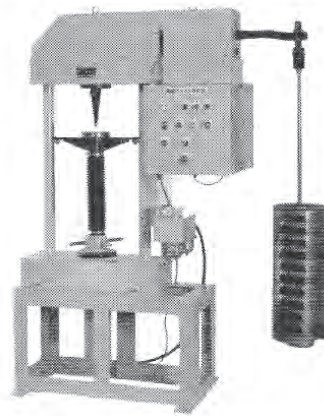
図5.1-2 油圧式ブリネル硬さ試験機
〔アメリカ Olsen社製〕^{*1)}



〔(株)島津製作所〕 〔(株)富士試験機製作所〕
図5.1-3 油圧式ブリネル硬さ試験機(オルゼン型)



〔(株)東京衡機製造所〕^{*1)}

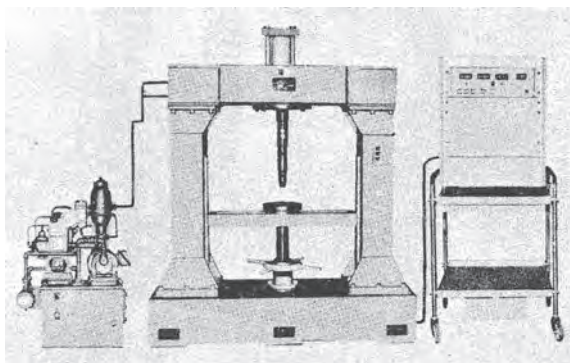


〔(有)今井試験機〕²⁾

図5.1-4 てこ式ブリネル硬さ試験機



図5.1-5 高速ブリネル硬さ試験機
〔(株)東京衡機製造所〕³⁾

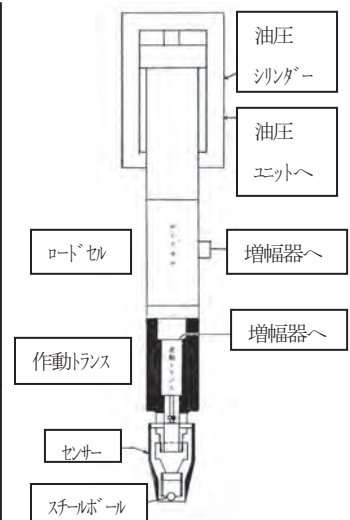


(a) システム外観

〔主な仕様〕

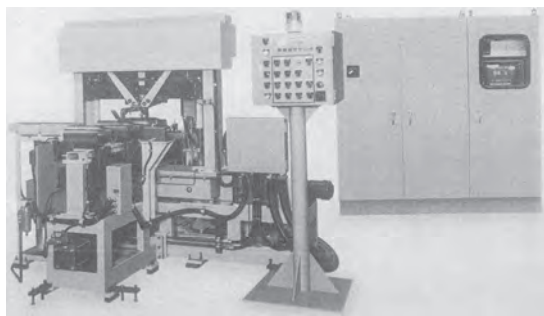
- ・最大荷重：3,000kgf
- ・荷重レンジ：750kgf、3000kgfの2段階
- ・荷重精度：各荷重に対し $\pm 0.5\%$
- ・読取り精度：くぼみ直径に対し $\pm 1\%$
- ・計測時間：40 sec

〔本体部〕・型式：門型機枠式、・加圧方式：油圧3段階制御加圧式（油圧シリンダーのストローク $\phi 100 \times 100\text{mm}$ ）、・荷重検出器：ひずみゲージ式ロードセル（容量4000kgf）、・深さ検出器：差動トランス、・主柱間隔：750mm、・圧子とテーブル最大間隔：450mm、・重量：約750kg
〔計測部〕・型式：デジタル表示式、・演算装置：マイクロコンピュータ

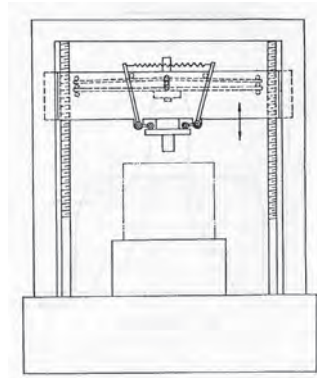


(b) 計測部

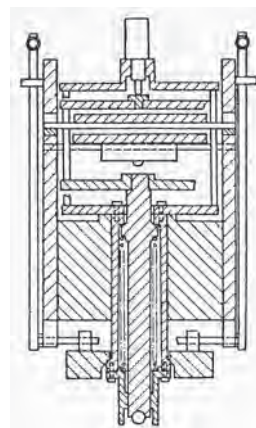
図5.1-6 全自動デジタル式ブリネル硬さ試験機(IDB型)〔(株)井谷衡機製作所〕⁴⁾



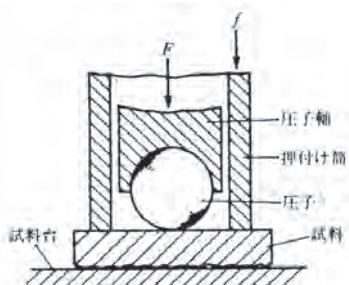
(a) システム外観



(c) 硬さ試験機全体図



(d) 計測機構



(b) 硬さ測定部

[主な仕様]

1. 測定方式: 試料押え→予備荷重・変位計セット→試験荷重→予備荷重→変位出力→合否判定→リセット、2. 試料押え: 荷重 1700kgf, 外径 30mm、3. 変位測定: 測定面に対する圧子変位、4. 変位計: リニアスケール、5. 変位分解能: $1\mu\text{m}$ 、6. 予備荷重: 300~1200kgf (可変)、7. 試験荷重: 3000kgf $\pm 1\%$ 、8. 圧子: 超硬合金球, 直径 10mm、9. 測定部速度: 約 1mm/s、10. 測定能力: 約 20 s/1 点、制御部: 操作パネル, 表示部, ロータリ増幅器, 変位計, 計算機等

図5.1-7 自動ブリネル硬さ試験機〔株〕明石製作所⁵⁾

5.2 ショア硬さ試験機^{*1、*5~9)}

図 5.2-1 には、我国におけるショア硬さ試験機の開発・変遷の概略が時系列でわかるように纏めた。A. F. Shore は 1906 年（明治 39 年）に、最も簡便な現場用硬さ試験機として、1/12 オンス（2.4g）の重量で先端にダイヤモンドを埋め込んだハンマーを 10 インチ（254mm）の高さから落下させ、その反発高さから材料の硬軟を識別する方法を考案、“スクレロスコープ”の名称で C 型ショア硬度計を製品化した。“スクレロ”はギリシャ語で“硬い”を意味する。この動的反発硬さ試験法による硬度計は計測筒と機枠（腕部と受台）からなる。C 型ショア硬度計では反発高さを目読で測定する。ショア社はその後、測定者の硬さ値読み取りを確実にするため、測定値がダイヤルゲージ式の目盛盤に指示される D 型スクレロスコープも開発した。図 5.2-2 には、オリジナルメーカーであるアメリカ ショア社製の C 型ショア硬度計〔製造：1922 年〕と D 型ショア硬度計〔製造：1923 年頃〕を示す。これら硬度計はともに、その後、我国で国産化されるショア硬度計のモデルとなった。C 型硬度計は 1932 年（昭和 7 年）頃に、また、D 型硬度計は翌 1933 年（昭和 8 年）頃に、当時の（合）明石製作所や（合）東京衡

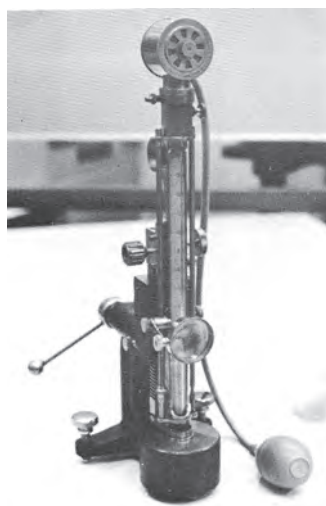
機製造所で相次ぎ国産化された。

鉄系、非鉄系を問わず、材料の圧延ロールはロール表面の硬さ測定で評価、管理、保証が行われており、特にショア硬さは測定値の取得が簡便で現場作業に適し、測定後の残留くぼみの形状がその後の圧延作業に大きな支障をもたらさない等の利点から、もっぱらショア硬さ測定が実施されてきた。我国では 1959 年（昭和 34 年）にカタサ研究会ロールカタサ研究分科会（現・日本材料試験技術協会ロール硬さ委員会）が組織され、ショア硬さ試験機の硬さ基準統一、信頼性の高い測定方法の確立等に産学官の関係者が努力した。その結果、従来のショア硬さ試験機の機枠へのアンビル打ち込みをやめて一体機枠を採用する等多くの改良点を見出し、これを JIS 規定に入れたのでショア硬さ試験機の信頼度は著しく向上した。

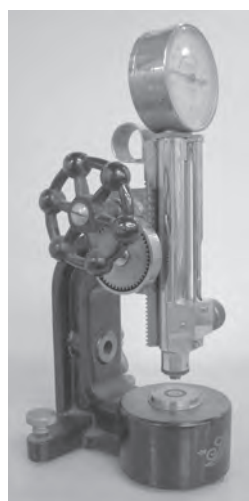
ロール硬さ委員会では 1970 年代にショア硬さ測定の実態調査を実施し、マスターロールを試作、委員会配布のショア硬さ基準片（C 型、D 型計測筒の目盛調整管理用で Roll マーク記入）を共同購入している。図 5.2-3 に示した形状で硬さレベルの異なる 8 本のマスターロールが 1964 年（昭和 39 年）に委員会で作成され、それぞれのロールの硬さ基準値は、会員事業所が実施したショア硬さ実態調査の結果と大型ビッカース硬さ試験機によるビッカース硬さ値から 1972 年（昭

速度を求め、その速度比からショア硬さに換算する研究を行うのに用いられた。図 5.2-9 に示した“HS-E 電子ショア硬度計”は、従来の C 型、D 型ショア硬度計の利点（瞬間的な測定）を生かし、操作上の相違による不利な点（測定値の不確実性、測定者の“くせ”による測定値の不一致、計測筒垂直保持以外の使用不可）を改善する目的で、ロール硬さ委員会の協力を得て（株）東衡テスタックで開発・製品化された。この硬

度計では、スプリングの復元力を利用し、演算増幅器とアナログデジタル変換回路等を介して得られた衝突前後の運動エネルギー比（速度比 V_1/V_0 の二乗）から、直接ショア硬さ値 HS として表示する^{8,9)}。 $HS = K' (V_1/V_0)^2$ [K' の値は、ショア硬さ基準片を用い、その基準値に電子硬度計のデジタル値が合致するように調整している]



(a) C 型^{*1)}



(b) D 型

図5.2-2 スクレロスコープ(ショア硬度計)
[アメリカ Shore社製]



(a) C 型

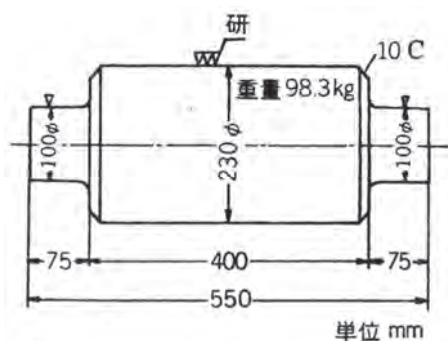
[(有)今井試験機]



(b) D 型 (S38型)

[(株)三光計器製作所]

図5.2-4 ショア硬度計の国産化



(a) ロール形状

ロール	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
HSD	100.4	94.3	89.1	83.1	71.6	61.0	49.0	43.4
HSC	99.9	93.9	89.0	82.8	71.4	60.2	48.5	42.7
VHS	96.1	89.9	85.1	80.1	69.9	59.7	48.4	43.0
HSD-HSC	0.5	0.4	0.1	0.3	0.2	0.8	0.5	0.7

(b) マスターロールの基準値

図5.2-3 マスターロールの試作[製作:ロール硬さ委員会]^{*7)}

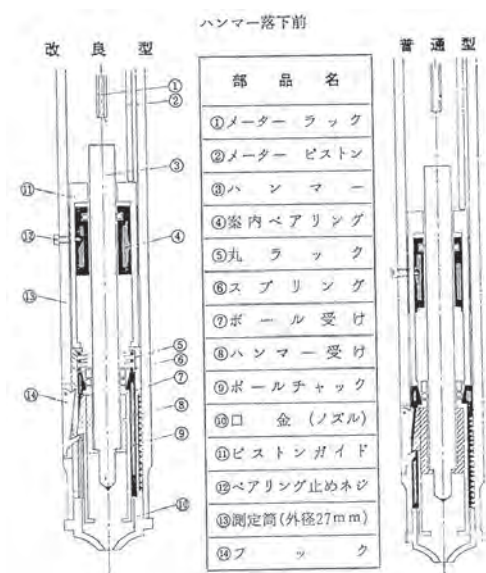


図5.2-5 ボールクラッチと落下機構の改良図
〔(株)三光計器製作所〕⁷⁾



(a) D 型



(b) D 型 (機枠のみ)

5.2-6 D型ショア硬度計〔(株)仲井精機製作所〕

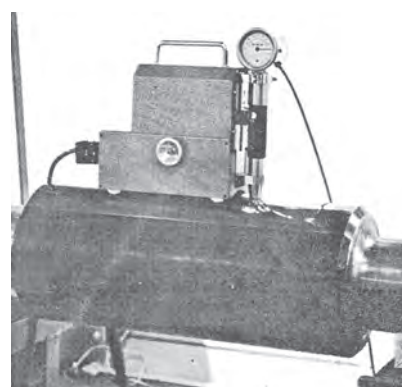


(a) 計測筒 PD-1



- 〔DA-72 の仕様〕
- ・押付力 約 20kgf
 - ・操作速度 40/min(max.)
 - ・アノール直径 107mm
 - ・アノール質量 4.1kg
 - ・試料当り面径 105mm
 - ・機体質量 約 15kg

(c) 基準片測定中の DA-72

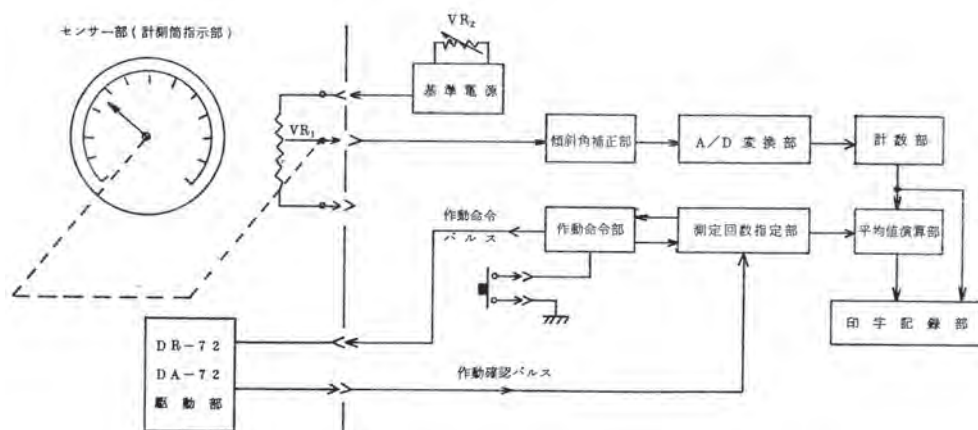


- 〔DR-72 の仕様〕
- ・押付力 約 20kgf
 - ・測定点間隔 2~5mm
 - ・測定サイクル 40/min
 - ・試料直径 100mm(min.)
 - ・機枠質量 約 9.5kg

(d) ロール測定中の DR-72



(b) コンピュータ ADR-72



(e) ADR-72 回路ブロックダイアグラム

図5.2-7 自動ショア硬度計(歩く硬度計:72シリーズ)〔(株)仲井精機製作所〕⁷⁾

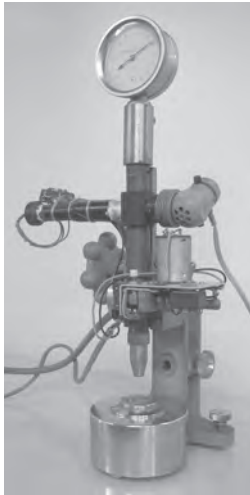


図5.2-8 光電管速度比型反発硬さ計
[東京大学 吉澤研究室]

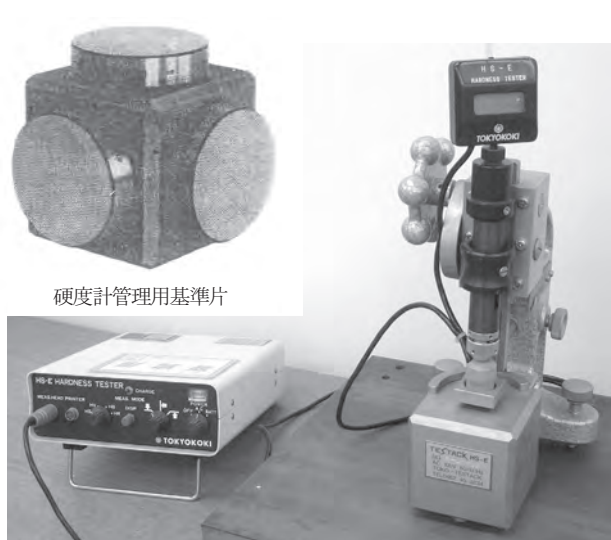


図5.2-9 HS-E 電子ショア硬度計
[(株)東衡テスタック]

5.3 ロックウェル硬さ試験機^{*1、*10)}

図 5.3-1 には、我国におけるロックウェル硬さ試験機の開発・変遷の概略が時系列でわかるように纏めた。ロックウェル硬さの試験法・試験機は 1919 年（大正 8 年）に S. Rockwell が考案、C. Wilson が実用化した。ロックウェル硬さは小鋼球または先端を曲率半径 0.2mm に丸めた円錐形のダイヤモンド圧子（円錐角度 120°）を用いて試料に 2 段階負荷を与え、そのくぼみ深さから求める。ロックウェル硬さでは基本荷重が 10kgf (98.07N) のときは“ロックウェル硬さ”、3kgf (29.42N) のときは“ロックウェルスーパーフィシャル硬さ”と称して、荷重の大小で区別している。ロックウェルスーパーフィシャル硬さ試験機は、先に製品化されたロックウェル硬さ試験機よりも小さい試験荷重での硬さ測定に供するために開発された。

東京府立商工奨励館は、1928 年（昭和 3 年）にオリジナルメーカーであるアメリカ ウィルソン社製の“2 段てこ式ロックウェル硬さ試験機”を、また、これより少し遅れて同社製の“2 段てこ式ロックウェルスーパーフィシャル硬さ試験機”を輸入・設置した。図 5.3-2 にこれら 2 機種の実験機を示す。1932 年（昭和 7 年）頃には当時の（合）明石製作所がこれをモデルに 2 段てこ式ロックウェル硬さ試験機を国産化しているが、我国でロックウェル硬さ試験機が産業分野で一般に広く用いられるようになるのは、その後、1 段てこ式のもの国産化されてからである。なお、（株）島津製作所は 1932 年（昭和 7 年）にブリロ型ロックウェル硬さ試験機を完成（10kgf の初荷重にばねを用

いたウィルソン式によらずてこ自重方式を採用）、また、1935 年（昭和 10 年）頃には藤田勝商店機械部がロックウェル・ブリネルコロンビン硬度計を製造販売している¹⁰⁾。

図 5.3-3 には、アメリカ ウィルソン社が“2 段てこ式ロックウェル硬さ試験機”の後継機種として開発・製品化した“1 段てこ式ロックウェル硬さ試験機”を示す。当初の 2 段てこ式から 1 段てこ式への負荷機構変更に伴い、2 本柱から 1 本柱の荷重支持構造に、また荷重負荷用の重錘配置は試験機上部から背面側に、負荷・除荷ハンドルの配置は試験機側面上部から側面下部に変更される等、試験機の測定精度や操作性が大幅に改善された構造となっている。この試験機は、その後、（株）明石製作所、（株）東京衡機製造所等で国産化される 1 段てこ式のロックウェル及びロックウェルスーパーフィシャル硬さ試験機のモデルとなった。

図 5.3-4 に示す“研究用ロックウェル硬さ試験機”は 1943 年（昭和 18 年）頃に東京大学の吉澤武男教授が考案した独特な構造のもので、各種硬さ間の関係表の研究その他に使用された¹¹⁾。圧子〔1〕は、荷重負荷てこ〔9〕の一端にある圧子取付け軸〔2〕の下部に押ネジ〔3〕で取付けられる。この軸〔2〕の上端は、柔軟性に富む針金〔35〕を介して深さ測定装置に接続している。試料〔4〕の受台〔5〕は、ハンドル〔7〕により上下する。荷重は、てこ〔9〕の支点〔10〕から 1m 離れた刃〔14〕に懸垂する受〔17〕上の重錘〔18〕により、1.1 倍に拡大されて圧子〔1〕に加えられる。呼鈴〔20〕はこの断絶接続を予知させるもので、受〔17〕、球面座〔19〕及びてこ〔23〕が連続し電気回路が閉鎖している期間だけ鳴る。重錘を

懸垂したままのてこ〔9〕端は差動ネジ〔25〕のハンドル〔28〕を回すことにより上下し、試料〔4〕に対し圧子を静かに近づけまたは引離すことができる。試料〔4〕と圧子〔1〕の相対変位を押痕深さとみなし、軸〔2〕と試料受台〔5〕にそれぞれ取付けられ互いに嵌合する2軸〔31〕と〔32〕に鏡式伸び計を取付け、その抜き差しの量に応じて動く鏡〔36 a〕と〔37 a〕との傾きを物差と望遠鏡により読み取る。

図 5.3-5 には(株)明石製作所の“ARK 型ロックウェル硬度計”〔製造:1960 年(昭和 35 年)〕を、図 5.3-6 にはこれに引き続き開発・製品化された“ARK-S 型ロックウェルスーパーフィシャル硬度計”〔製造:1967 年(昭和 42 年)〕を示す^{12,13)}。これらの硬度計はウィルソン(Wilson)社の“1 段てこ式ロックウェル硬さ試験機(3 J R 型)”をモデルに国産化されたものである。ARK-S 型硬度計の試験荷重は 15、30、45kgf の 3 種類で、薄い板材、窒化・浸炭層、きわめて軟らかい材料等の硬さを測定する目的で設計された。

1975 年(昭和 50 年)頃からは産業界で硬さ試験の自動化が強く望まれるようになり、特に製鉄会社では薄鋼板試験やジョミニ試験等でロックウェル硬さ試験の自動化が急速に進められた。その背景には膨大な試験データの記録・作表、生産ラインへの速やかなデータフィードバック、個人誤差の排除、単調な試験作業からの解放、高能率化、省力化への強いニーズがあった。図 5.3-7 には、その頃に松沢精機(株)が開発し

た全自動ジョミニ硬さ試験作表システムを示す^{14,15)}。このシステムは“DRH-FA 型全自動デジタルロックウェル硬さ試験機”と自動試料供給除去装置、ミニコン制御自動記録装置、制御盤からなり、構造用鋼の焼入れ性を調べるジョミニ試験で、硬さ試験完了と同時に各測定点を結ぶ焼入れ性曲線(H バンド曲線)を自動的に作図できる。硬さ試験機においては、荷重軸の移動量をプランジャ型差動トランスで直線運動として計測し、基準荷重はモーターで試料台を上昇させ所定位置(HRC100 相当)まで基準荷重用ばねを圧縮することにより負荷する。試験荷重の負荷・除荷と速度制御はダッシュポット(オイルダンパー)とモーターで行う。主てこ先端に設置した光電導セル無接触検出機構で試料への圧子停止時点を検知し、タイマー設定の荷重保持時間が過ぎると交流モーターでカムを回転させ突き上げ棒を押上げる。硬さ値(圧子侵入量)は差動トランスと A-D 変換器によりデジタル化される。

一方、(株)明石製作所はダイヤルゲージを電動の自動セット方式にして操作を簡素化した装置を 1973 年(昭和 48 年)に、変位計にリニアスケールを採用し高精度化を図ったデジタル装置を 1978 年(昭和 53 年)に、圧子軸を押上げて基準荷重を負荷する操作で自動停止する方式のデジタルロックウェル硬度計を 1980 年(昭和 55 年)に開発している¹⁶⁾。図 5.3-8 に示した“AHT-S 型自動ロックウェルスーパーフィシャル硬度計”では試料を自動供給、試料の硬さを順

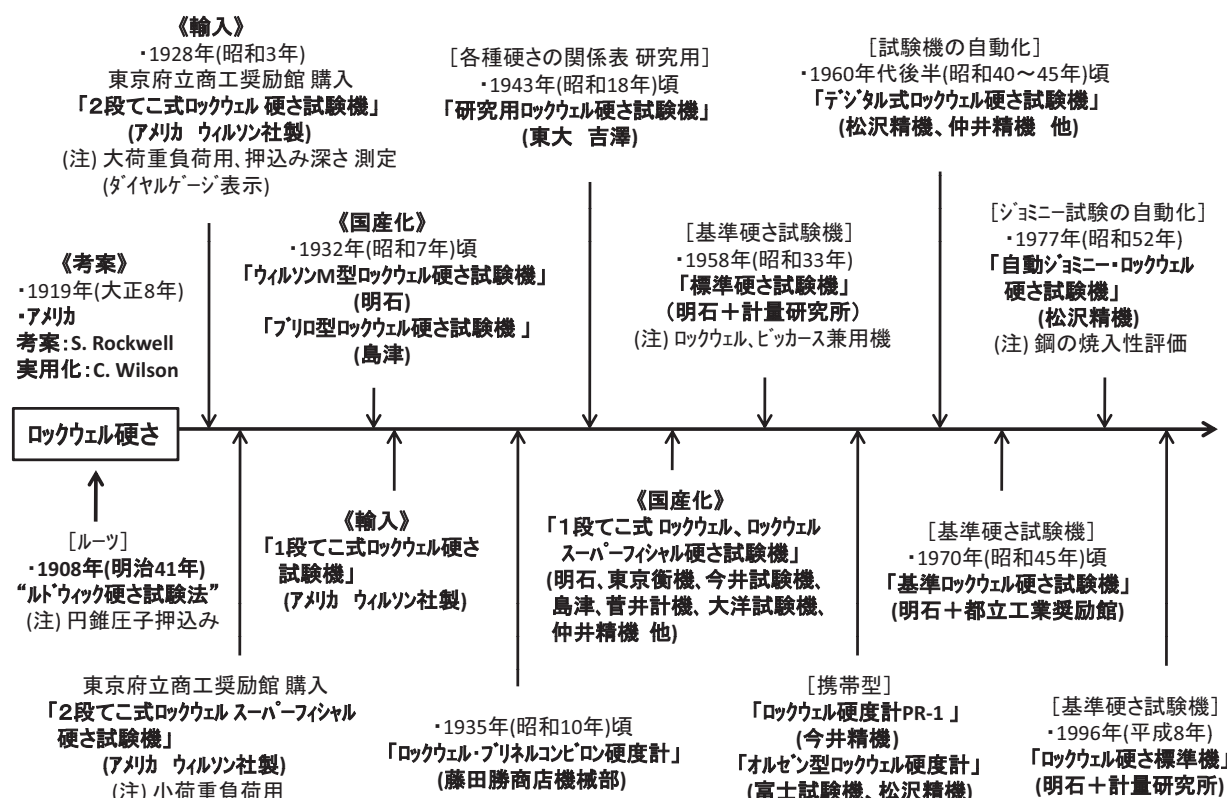


図5.3-1 ロックウェル硬さ試験機の開発と変遷

次自動測定し、試料毎に各測定値と平均値を自動記録する¹⁷⁾。この試験機の荷重機構には基準荷重に摩擦力が全く作用しない独特の負荷方式を、変位計測機構に差動トランス型変位計よりも環境温度に対する感度が鈍い磁気スケール型変位計を採用している。また、

2003年（平成15年）に開発された“ロックウェル硬さ試験機 WiZhard”においては、重錘方式から脱却し、初試験力発生機構と全試験力発生機構を一つのサーボモーターによる力発生機構で単純化し、従来機に比べ可動部品点数を大幅に減らしている¹⁸⁾。



(a) 左側面



(b) 右側面

(a) ロックウェル



(a) 左側面



(b) 右側面

(b) ロックウェルスーパーフィシャル

図5.3-2 2段てこ式硬さ試験機[アメリカ Wilson社製]*¹⁾



図5.3-3 1段てこ式ロックウェル硬さ試験機[アメリカ Wilson社製]*¹⁾

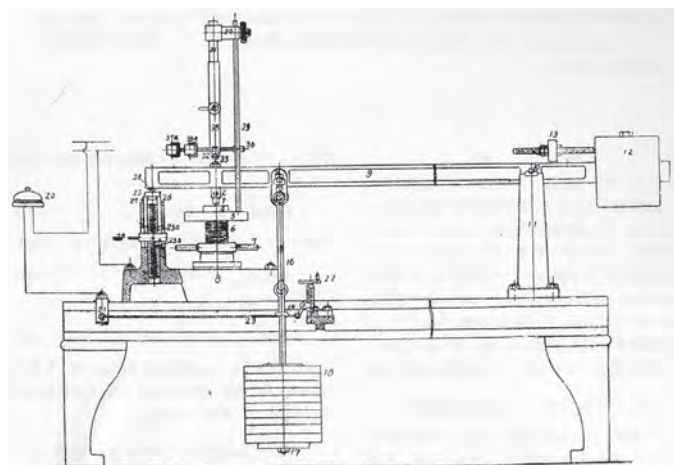


図5.3-4 研究用ロックウェル硬さ試験機¹¹⁾
(考案:東京大学 吉澤武男教授)



(a) 正面側



(b) 背面側

図5.3-5 ロックウェル硬度計(ARK型)
[(株)明石製作所]

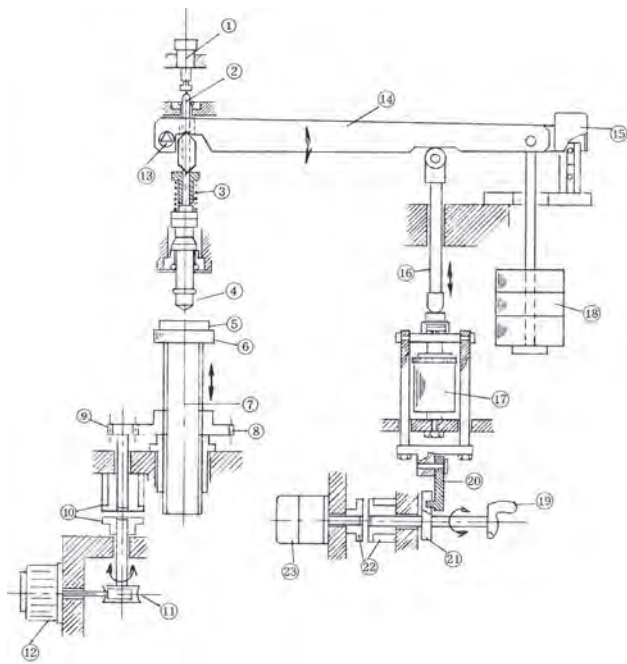


(a) 正面側



(b) 背面側

図5.3-6 ロックウェルスーパーフィシャル硬度計
(ARK-S型) [(株)明石製作所]



- 1.差動変圧器 2.荷重負荷部 3.基準荷重用ばね 4.圧子
5.試料 6.アンビル(平) 7.親ネジ 8.大平歯車 9.小平歯車
10.クラッチ 11.ウォームギヤホイール 12.モーター 13.ナイフエッジ 14.メインレバー
15.荷重負荷検出部 16.突上棒 17.オイルダンパー 18.重錘
19.調整ハンドル 20.リンク 21.カム 22.クラッチ 23.ACモーター

(a) 硬さ試験機の作動図

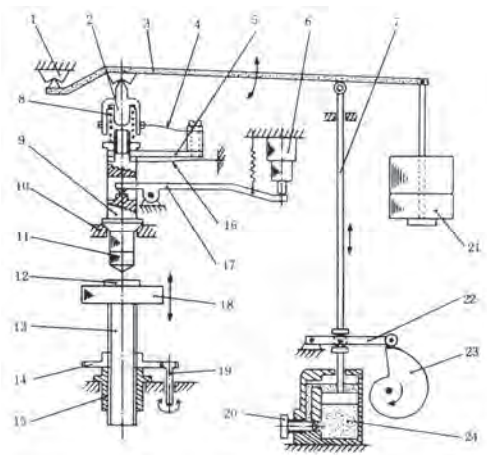


(b) 硬さ試験機



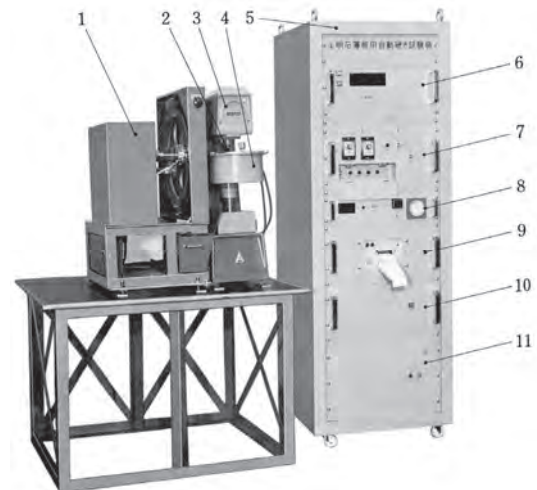
(c) 全自動ジョミニー硬さ試験作表システム

図5.3-7 全自動デジタル式ロックウェル硬さ試験機(DRH-FA型)[松沢精機(株)]¹⁴⁾



- 1.支点 2.荷重軸 3.荷重レバー 4.板ばね 5.ばね支持具
6.マグネツクル 7.制御軸 8.基準荷重ばね 9.圧子軸
10.ストップ 11.圧子 12.試料 13.昇降軸 14.昇降歯車
15.案内筒 16.板ばね 17.拡大レバー 18.試料台 19.駆動軸
20.速度調整針 21.重錘 22.解放レバー 23.カム 24.オイルダンパー

(a) 主要機構



1. 試料供給装置 2.圧子 3.硬度計本体 4.回転
テーブル 5.制御装置 6.硬さ表示パネル 7.操作パネル
8.試料数表示パネル 9.プリンターパネル 10.駆動制御パネル
11.電源パネル

(b) 試験機の構成

[仕様]・試験荷重: 15、30、45kg ・荷重保持時間: 2~30sec (可変) ・試料寸法: 外形 35×50mm, 厚さ 0.2~6mm
・試料装填数: 100 個 ・測定能力: 約 90sec/1 試料 ・硬さ表示値: 最小単位 0.1 硬度以下 ・精度: JIS 準拠

図5.3-8 自動ロックウェルスーパーフィニッシュ硬度計(AHT-S型)[(株)明石製作所]¹⁷⁾

5.4 ビッカース硬さ試験機 (含. ヌーブ硬さ)

*1、*11)

図 5.4-1 には、我国におけるビッカース硬さ試験機の開発・変遷の概略が時系列でわかるように纏めた。ビッカース硬さ試験機は、ビッカース・アームストロング (Vickers-Armstrong) 社の R. Smith と G. Strandland が 1925 年 (大正 14 年) に、ブリネル硬さを基準にして低硬度から高硬度まで同一スケールで表すことができる試験機として考案したもので、ビッカース硬さは正四角錐ダイヤモンド圧子に試験荷重を負荷して生じたくぼみの対角線長さから求められる。図 5.4-2 は、東京府立商工奨励館が 1935 年 (昭和 10 年) に同社から購入したものである。オリジナルメーカーであるイギリス ビッカース・アームストロング社製の試験機をモデルに国産化された (株) 明石製作所の“ダイヤモンドピラミッド硬度計 (アームストロング型ビッカース硬さ試験機)”を図 5.4-3 に示す¹⁹⁾。我国では国産ビッカース硬さ試験機の草分け的存在で、当初は主に金属材料の研究に用いられた。(株) 島津製作所は、(株) 明石製作所や (株) 東京衡機製造所より 2、3 年遅れて、1939 年 (昭和 14 年) に“アームストロング型ビッカース硬さ試験機”を製品化している。

一方、微小硬さ試験機は戦後、主に金属組織、結晶粒子等の金相学研究に利用されてきた。戦後の産業界の復興・発展に伴い、浸炭・窒化・高周波焼入れ等の表面硬化処理層、メッキ層、時計・マシン部品等の熱処理部品その他通信機用の薄伸銅板、板・管の伸銅品の材質管理等、利用範囲は多岐にわたるようになった。

東京大学工学部では、第 2 次大戦後の早い時期に特別の扱いを得て“Tukon Tester”を購入し、微小硬さの研究を始めている。Tukon Tester はアメリカウィルソン社が 1940 年代に開発・製品化したビッカース微小硬さ試験機の製品名称で、圧子を変えることによりヌーブ硬さも測定できる [図 5.4-4 参照]^{*1)}。“デュリメット (DURIMET)”は、ドイツ ライツ社が 1940 年代に開発・製品化した微小荷重硬度計の製品名称で、添付の硬さ換算表によれば 10gf から 2kgf の試験荷重範囲でダイヤモンド四角錐圧子によるビッカース硬さ測定ができ、その当時としては画期的な卓上型の高精度微小硬さ試験機に仕上げられている。図 5.4-5 に示したデュリメット硬度計は第 2 次大戦後早くに輸入されたもので現在もユーザーのもとで使用されている²⁰⁾。(株) 島津製作所は 1954 年 (昭和 29 年) に、“デュリメット型微小硬度計”を製品化している。

(株) 東京衡機製造所は昭和 20 年代の初期にいち早く、対物レンズに圧子を埋め込んだユニークな構造の“共軸微小硬度計”を製造市販したが、普及には至らなかった [図 5.4-6 参照]。その頃、武蔵工業大学の寺沢正男教授は軟質金属の金属組織や変形挙動を研究する過程で、必要にせまられ、本多達三講師の協力を得て“寺沢式微小硬度計”を考案した [図 5.4-7 参照]^{21,22)}。荷重負荷に精密天秤の原理を応用したことで、極めて高感度にビッカース硬さを測定できるようになった。5 ~ 500gf の荷重範囲で測定が可能で、負荷速度調整にオイルダンパーを使用しないので機械的な測定誤差がない。圧子を別に用意すれば、ヌーブ硬さや引掻き硬さの測定もできる。試作機を用いて得られた実験データは 3 年有余学会等で発表され、測定精度、安定性、耐久性でその優秀性が関係者に認められ、1949 年 (昭和 24 年) に大洋テスター (株) で製品化された²³⁾。その後、1972 年 (昭和 47 年) には電動式自動負荷装置付きの“寺沢式 M- II 型微小硬度計”が製品化されている²⁴⁾。なお、1960 年 (昭和 35 年) には、(株) 弥満和製作所においても“TY 式微小硬度計”と称して寺沢式硬度計が製品化されている²⁵⁾。

1950 年 (昭和 25 年) には (株) 明石製作所で“MVK-A 型微小硬度計”が開発・製品化された [図 5.4-8 参照]^{20,26)}。その試験荷重は 50 ~ 1000gf で、負荷機構は直接荷重、負荷制御は手動 (試料台上下式)、負荷機構と顕微鏡は独立配置となっている。この硬度計は“寺沢式微小硬度計”と並び我国での微小硬度計の草分け的存在で、(株) 明石製作所ではこの機種が発端となり、その後今日まで、さらに高精度・高機能の微小硬度計が続々と開発されることとなった [表 5.4-1 参照]²⁶⁾。1955 年 (昭和 30 年) に開発された“MVK-C 型微小硬度計”では、試験荷重が 25 ~ 1000gf となり、その操作性のよさ (短時間で測定可能) とデザイナー Frederick Hoffer の意匠による機能的かつ斬新なスタイルで科学技術庁長官賞を受賞している^{13,26)}。(株) 島津製作所はこれとほぼ同時期に、ドイツライツ社のデュリメット試験機の基本構造を踏襲した“HVM-M 型ビッカース微小硬度計”を開発・製品化している [図 5.4-9 (a) 参照]²⁷⁾。ダイヤモンド圧子には軽合金製のでこで負荷を与える。負荷機構としては、支点を中心にカム・軸・スプリングを介して速度調節が可能な小形ダンパーが作動、負荷用でこ端部のピアノワイヤで圧子を垂直に保持し、常に試料面に直角に押圧する (15 ~ 500gf の荷重範囲で 7 種類の荷重負荷が可能)。また 1974 年 (昭和 49 年) に (株) 明石製作所は、“MVK-E 型微小硬度計”を開

発・製品化している[図 5.4-9 (b) 参照]。この機種は MVK-C 型の後継機種として開発されたもので、負荷制御(負荷・保持・除荷)が初めて自動化され(カムをモータ駆動、負荷速度は 60 $\mu\text{m/s}$)、試験荷重範囲も 10 ~ 1000gf と最小荷重はさらに小さくなった(MVK-C 型では 25gf)。負荷機構は直接荷重方式で、下段 10gf には圧子系レバーを、上段 15gf 以上には追加おもり系(支持は板ばね)を採用、圧子と対物レンズの切替えは従来の独立配置からタレット式に変更し、操作性の改善を図っている²⁶⁾。

また、微小硬さ試験機よりも試験荷重の大きいビッカース硬さ試験機分野では、(株)明石製作所が 1959 年(昭和 34 年)に、従来の床置き式の“アームストロング型”とは異なり、卓上式に小型化し、操作性の簡便化を考慮、かつ、斬新で機能的な外観を実現した画期的な“AVK 型ビッカース硬度計”を開発・製品化した[図 5.4-10 参照]。この硬度計の意匠も日本専売公社がたばこ“PEACE”の外箱デザインで招聘したデザイナー Frederick Hoffer による。試験荷重は 1 ~ 50kgf、負荷機構はてこ式(てこ比 10)、負荷制御はオイルダンパー、除荷は手動で、圧子と対物レンズの切替えにタレット式を採用している*^{1,13,26)}。AVK 型ビッカース硬度計が出現したことで、アーム

ストロング型では研究室の備品の位置を脱しきれなかったビッカース硬さ試験機が、ブリネルやロックウェルの硬さ試験機と同様に、各種工業製品の検査部門で材質検査機器として広範囲に活用される道を開いた功績は極めて大きい。

計測の自動化に関しては、1979 年(昭和 54 年)に(株)明石製作所は、上述の“MVK-E 型微小硬度計”に“自動くぼみ読取り装置”と“X-Y 自動テーブル”を組み合わせ、我国で初めてビッカースまたはヌーブ硬さの自動計測を可能にした“ビッカース自動硬さ試験機 オートビック (Autovick)”を開発・製品化している[図 5.4-11 参照]。この試験機では、対物レンズを介して CCD カメラで圧痕形状の映像を取込みモニターテレビに表示、モニター上のくぼみ対角線長さ(2 方向)を画像処理により 0.1 μm 単位で自動計測する(測定分解能は対物レンズ毎に最大くぼみ測定値の 0.3%)。特別仕様で自動タレット装置と自動焦点合わせ装置も装備する^{26,28,29)}。また、1980 年代半ばに松沢精機(株)は、“自動読取装置付き全自動ビッカース硬度計 EMVI-CK1000 型”をベースに製造ライン用の全自動硬さ試験システムを開発している^{30~33)}。

2006 年(平成 18 年)には上述のオートビックをさらに発展させた微小硬さ試験システム“MicroWizhard

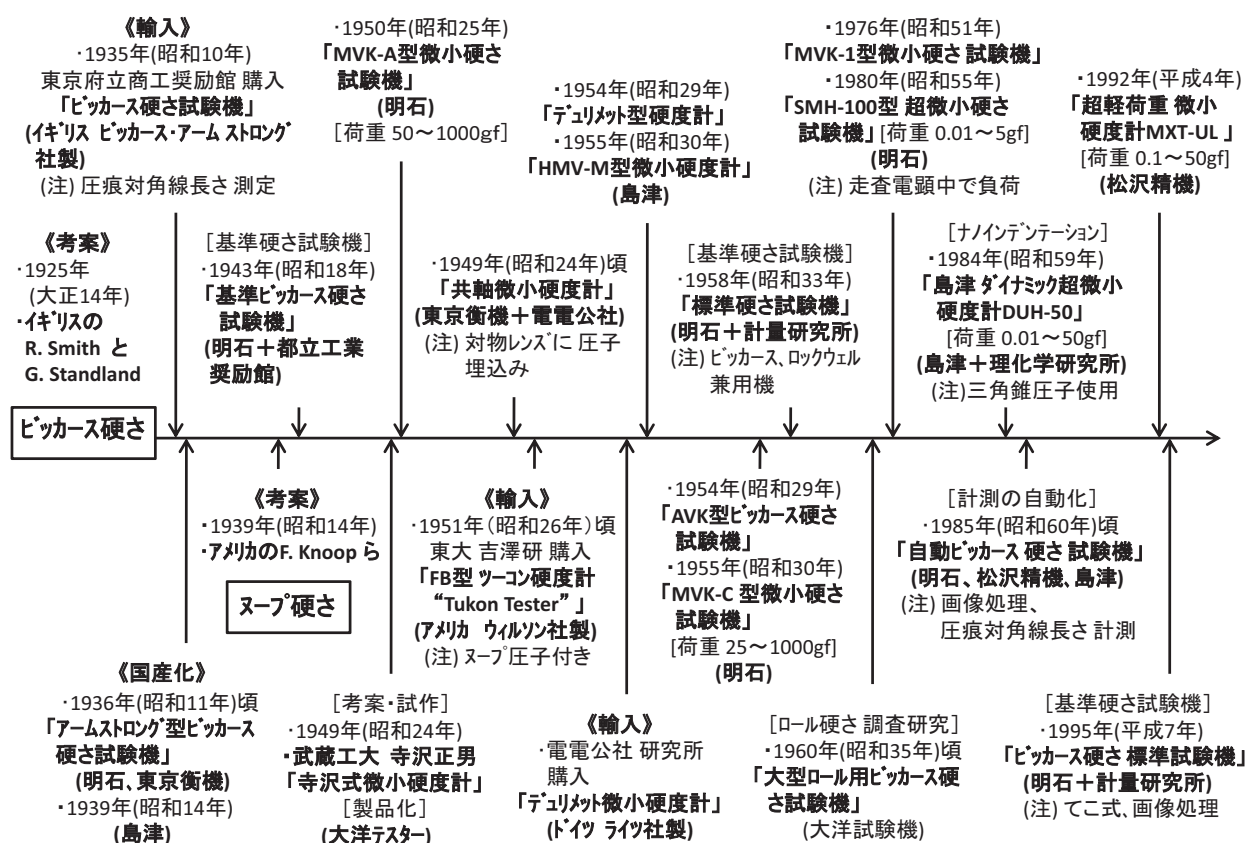


図5.4-1 ビッカース硬さ試験機(含. ヌーブ硬さ)の開発と変遷

HM-200 シリーズ (HM-221 型、HM-211 型)”を(株)ミットヨが開発・製品化した [図 5.4-12 参照]³⁴⁾。この HM-200 シリーズでは 2 つのフォースモータユニット (電磁力方式) を装備、低試験力発生用の小フォースモータは圧子軸に直接取付け、高試験力発生用の大フォースモータは荷重アームによる拡大機構と組合せユニットのコンパクト化を図っている。なお、HM-221 型の最小試験力を安定的に実現するため、① 低ばね定数の板ばねを用いた圧子軸支持機構、② 圧子軸可動部の質量を相殺するバランス錘、③ 小フォースモータの圧子軸直接取付けによる圧子軸可動部の質

量低減等で、外乱要因の振動を抑制している。また、圧子軸の上下 2 箇所板ばねを組合せ使用し上下の自由側を連結することで、圧子軸をより長ストロークで一直線上を移動できるようにしている。画像処理による硬さ値自動算出に際しては、くぼみ稜線を 2 次曲線で近似し、これらの交点からくぼみ対角線長さを測定する。この試験機を開発した目的の一つに、ビッカース硬さ試験と後述 (5.7 章) のナノインデンテーション試験で得られる硬さ値との互換性の考察がある。

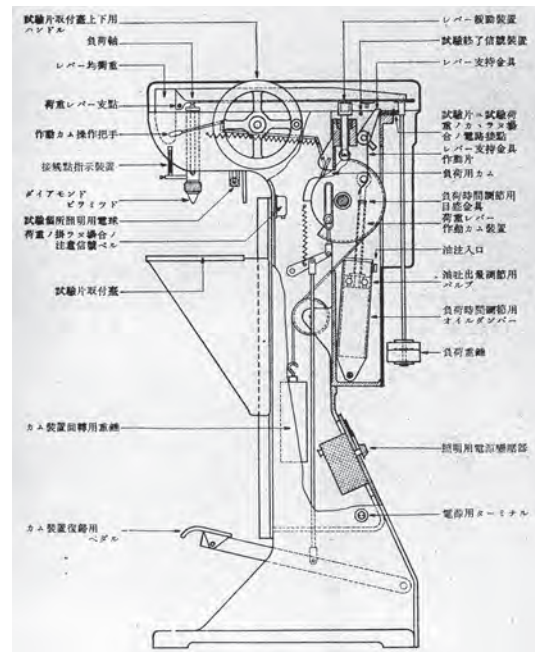
《参考》(株)明石製作所は 2004 年 (平成 16 年) に (株)ミットヨと合併し、(株)ミットヨに社名変更した。



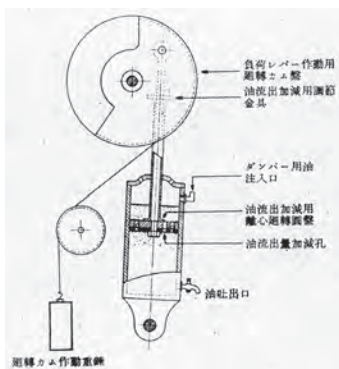
図5.4-2 ビッカース硬さ試験機*1)
[イギリス Vickers-Armstrong 社製]



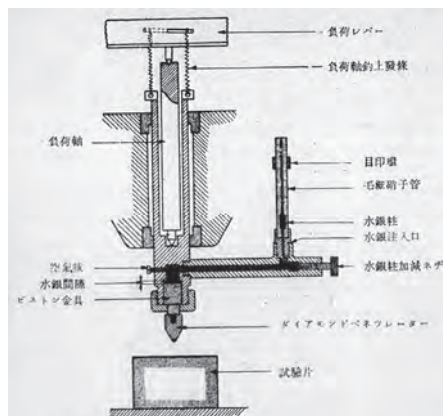
(a) 外観



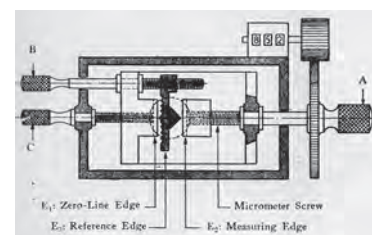
(b) 構造



(c) オイルダンパー



(d) 接触点指示装置



(e) 測微頭微鏡

図5.4-3 ダイヤモンドピラミッド硬度計(アームストロング型ビッカース硬さ試験機) [(株)明石製作所]¹⁹⁾



図5.4-4 ツーコン(Tukon)試験機
[アメリカ Wilson社製]^{*1)}



図5.4-5 デュリメット微小荷重
硬度計[ドイツ Leitz社製]²⁰⁾

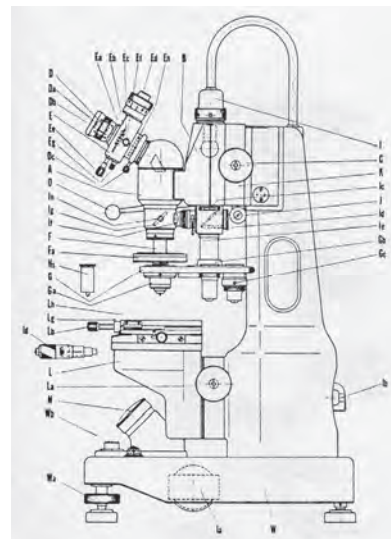
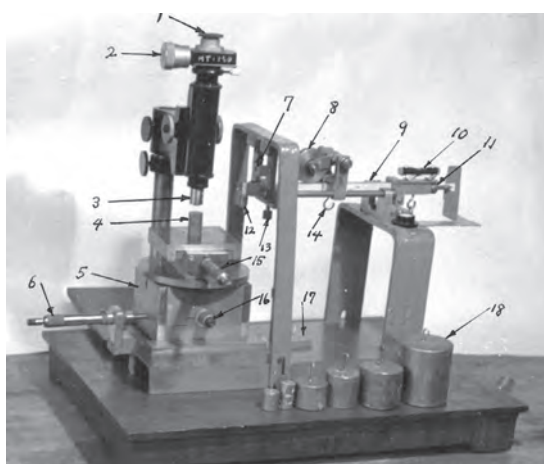


図 5.4-6 共軸微小硬度計
[(株) 東京衡機製造所]^{*1)}



- | | |
|------------------|------------------|
| ① 接眼レンズ | ② 測微計 |
| ③ 対物レンズ | ④ 試料 |
| ⑤ 載物台 | ⑥ マイクロメーター・スクリュー |
| ⑦ 荷重確認目盛板 | ⑧ 荷重調整ロール |
| ⑨ 天秤 | ⑩ レベル |
| ⑪ バランシング・ウェイト | ⑫ ダイヤモンド圧子 |
| ⑬ 調整ネジ | ⑭ フック |
| ⑮ マイクロメーター・スクリュー | ⑯ 微動ハンドル |
| ⑰ ストップパー | ⑱ 荷重 |

(a) 試験機の試作 (寺沢正男教授の考案)
[武蔵工業大学 工学部 機械材料研究室]²²⁾



(b) M-I型

- [M-I型の特長・仕様]
- ・荷重負荷に精密化学天秤の原理を応用したことで極めて高感度
 - ・負荷速度調整にオイル・ポンプを不使用、機械的測定誤差がない
 - ・試験終了後 試料台を横にスライドするだけで顕微鏡による圧痕測定ができる
 - ・試験荷重：5～500gf
 - ・顕微鏡倍率：×600、×200
(測定単位 0.5 μ m)
 - ・後継機の M-II型は、電動式自動負荷装置付き



(c) M-II型

図5.4-7 寺沢式微小硬度計[大洋テスター(株)]^{23, 24)}



(a) MVK-A 型

[MVK-A 型の主な仕様]

- ・試験荷重：50～1000gf
- ・負荷機構：直接荷重
- ・負荷の制御は手動（試料台上下式）
 負荷：負荷機構を上昇
 除荷：負荷機構を下降
- ・負荷機構と顕微鏡は独立配置

[MVK-C 型の主な仕様]

- ・試験荷重：25～1000gf
- ・負荷機構：直接荷重、側圧防止式
- ・負荷の制御は手動（試料台上下式）
 負荷：試料台を上昇
 除荷：試料台を下降
- ・操作性に優れる（短時間で測定可能）



(b) MVK-C 型

図5.4-8 ビッカース微小硬度計[(株)明石製作所]^{13, 20, 26)}



(a) HMV-M 型 [(株)島津製作所] (b) MVK-E 型 [(株)明石製作所]²⁶⁾

図5.4-9 ビッカース微小硬度計

[主な仕様]

- ・従来の床置き式を卓上型構造に小型化し、操作の簡便化、斬新で機能的な外観を実現（デザイン：Frederick Hoffer）
- ・試験荷重：1～50kgf、
- ・負荷機構：てこ式（てこ比 10）
- ・負荷の制御 負荷：オイルダンパー、除荷：手動
- ・圧子と対物レンズの切替え：タレット式

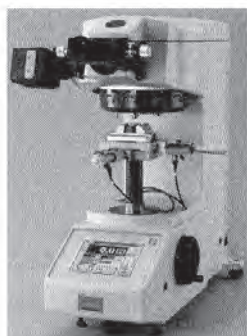
図5.4-10 ビッカース硬度計 (AVK型)
 [(株)明石製作所]²⁶⁾



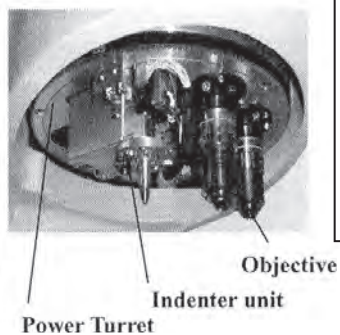
図5.4-11 ビッカース自動硬さ試験機
 (Autovick) [(株)明石製作所]^{*1, 26, 28)}

表5.4-1 (株)明石製作所におけるビッカース硬さ試験機の開発[1950～1980年(昭和25～55年)]²⁶⁾

開発年	型式	試験力	負荷機構	負荷の制御	特記事項
1950 (昭25)	MVK-A	50～1000 gf	・直接荷重	・手動(試料台上下式) 負荷: 負荷機構を上昇 除荷: 負荷機構を下降	・負荷機構・顕微鏡: 独立配置
1954 (昭29)	AVK	1～50 kgf	・レバー式 レバー比: 10	・負荷: オイルダンパー ・除荷: 手動	・圧子・対物切替え: タレット式 ・卓上型、レバー釣合せ: おもり ・デザイン: Frederick Hoffer
1955 (昭30)	MVK-C	25～1000 gf	・直接荷重 側圧防止式	・手動(試料台上下式) 負荷: 試料台を上昇 除荷: 試料台を下降	・操作性がよい(短時間で測定可能) ・デザイン: Frederic Hoffer ・後に Wilson 社が同じ荷重範囲の微小硬度計 Model LL 型を発売
—	実験機	5～30 gf 25～1000 gf	・直接荷重 側圧防止式	・油圧(蓄圧器式)	・5 gf 以上 マクロ硬さまで荷重依存性がないことを確認
1967 (昭42)	MVK-5	5～30 gf	・直接荷重 側圧防止式	・負荷: オイルダンパー ・除荷: 手動	・上記実験機の負荷制御系を変更、コンパクト化
1967 (昭42)	超高温 硬度計	50～2000 gf	・直接荷重 ・硬さ測定 max. 1700℃、観察 max.2000℃	・自動	・くぼみの測定: 走査電顕 ・加熱方法: 電子ビーム式 ・温度校正: Au, Co, Pt 等 純金属 の溶融・凝固状態の観察
1969 (昭44)	MVK-D	50～1000 gf	・上下2段 下段: 10 gf (圧子系レバー) 上段: 15gf 以上の追加 おもり系(板バネ支持)	・自動 負荷: 負荷機構を下降 除荷: 負荷機構を上昇	・圧子系・対物切替え: タレット式 ・バネ力とオイルダンパーにより、 負荷・保持・除荷を制御 ・圧子レバー系のガイド: 十字バネ ・推奨速度: 30 μ m/s
1974 (昭49)	MVK-E	10～1000 gf	・直接荷重 下段: 10gf 圧子系 上段: 15gf 以上の追加 おもり系	・自動(電動型) カムをモーター駆動	・圧子系・対物切替え: タレット式 ・負荷速度: 60 μ m/s
1975 (昭50)	Autovick オートビック	10～1000 gf			・自動読取り式 (くぼみの面積測定方式)
1976 (昭51)	MVK-1	1～20 gf	・準直接荷重 圧子軸の自重: 2.3 g (含. 圧子)、自重キャン セル: コイルバネ	・自動 電磁力による力制御	・負荷速度: 1～40 gf/s ・圧子接近速度: 10～400 μ m/s
1976 (昭51)	AVK-A	1～50 kgf	・レバー式 レバー比: 10	・自動 カムをモーター駆動	・レバー系の軽量化 ・レバーの釣合せ: コイルバネ
1979 (昭54)	MVK-F	10～1000 gf	・直接荷重	・手動	・E 型(電動型)の手動タイプ ・MVK-C 型の代替機
1980 (昭55)	SM (SMH- 100)	0.01～5 gf	・圧子軸: 平行バネ支持 ・最小荷重: 自重をコイル バネでキャンセル ・バネ定数: 0.35 mgf/ μ m	・電磁力式	・負荷機構: 走査電顕の試料室内で 負荷過程の観察が可能 ・くぼみ測定: 走査電顕 ・負荷速度: 0.1～1、2、5、7.5、20 μ m/s (圧子接近速度: 400 μ m/s)



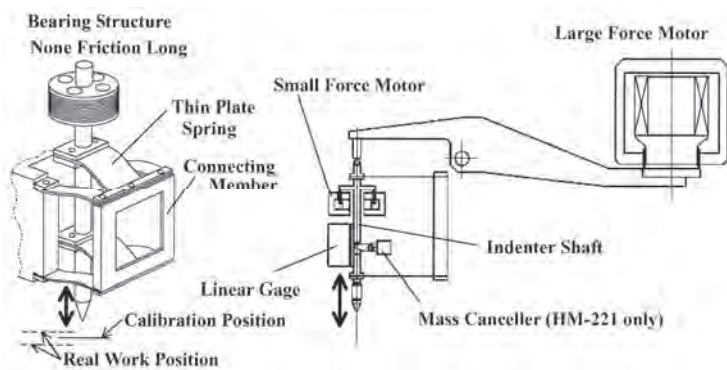
(a) 試験機の外観



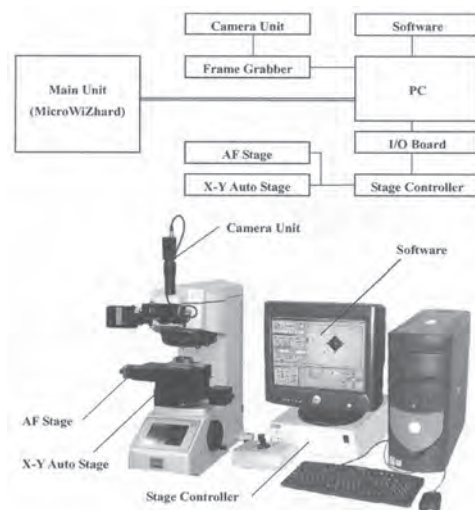
(b) タレット部

[主な仕様]

- ・試験荷重：HM-221 型 0.05g～2kgf、HM-211 型 10g～1kgf
- ・試験力発生機構：電磁力方式（フォースモーター ユニット 2 個）
高試験力：大フォースモーターと荷重アームによる拡大機構の組合せ
低試験力：板バネによる圧子支持機構とフォースモーター、バランス錘
- ・くぼみ対角線長さ計測：自動焦点合せ(AFステージ)の採用



(c) 荷重負荷部の構造



(d) 画像処理による計測システム

図5.4-12 微小硬さ試験システム (MicroWiZhard HM-221型、HM-211型) [(株)ミットヨ]³⁴⁾

5.5 高温硬さ試験機

高温硬さ試験とは、材料内で生じる原子の移動（拡散）過程における硬さを測定することである。拡散に伴う金属材料の変態、回復、再結晶、析出、過時効、再固溶等の現象は温度と時間に依存するので、高温硬さ試験では温度と時間の管理がばらつきの小さいデータを得るために最も大切な要件となる^{35,36)}。

海外では、1932年（昭和7年）に J. F. Kayser がタービンブレードの高温強度研究用に円錐圧子による高温硬度計を開発し、1937年（昭和12年）頃にアメリカマサチューセッツ工科大学（MIT）の E. G. Bishop と M. Cohen が昇温中の硬さ変化を直接測定するためロックウェル高温硬度計を、また、F. P. Bensらがビッカース高温硬度計を発表している。一方、我国でも、1934年（昭和9年）に浜住松二郎が落球反発式で高温硬さの研究を行っており、第2次大戦後間もなく（株）明石製作所と山梨大学が共同で押込み式微小硬度計を計画し、1952年（昭和27年）に試作機を同大学工学部に納入している³⁷⁾。

我国ではその後、1956年（昭和31年）に（株）島津製作所が加熱炉を装備したアームストロング型ビッカース硬さ試験機〔図5.5-1 参照〕を、1959年（昭和34年）には（株）明石製作所が炉体を組合せた“アカシ・ビッカース硬さ試験機 AVK-HF ”〔図5.5-2 参照〕を高温試験用に開発している。また、日本光学工業（株）では材料研究用の装置として、1963年（昭和38年）に“Nikon 高遠式高温微小硬度計”〔図5.5-3 参照〕を、1972年（昭和47年）には“ニコン高温微小硬度計 HT-5”を、1976年（昭和51年）にはこれをさらに進化させ、高温顕微鏡と高温硬度計の両機能を備えた“QM 型高温顕微硬度計”〔図5.5-4 参照〕を開発・製品化している^{38,39)}。この高温顕微硬度計では、室温から1600℃の温度範囲で、真空または不活性ガス雰囲気の下で試料室内で金属やセラミックスの加熱、急冷、徐冷、溶融、凝固を行い、そのミクロ変化を顕微鏡で観察し、高温硬さ（マイクロビッカースまたはヌーブ）を測定することができる。

なお、温度係数因子として試験面温度が最重要であるが、試験温度の計測は AVK-HF では試験片裏面にあけた温度計測穴で、QM では標準型試験片の場合試料ホルダーで行う。次に重要なのは圧子温度である。本来は圧子温度も試験面温度と同一にすべきであるが、圧子を加熱すると圧子自身も軟化するため、あまり高温にはできない。たとえば、常温硬さ HV6000

～9500 のダイヤモンド圧子は1000℃で HV4000 まで軟化、常温で HV2100 ～2400 のサファイヤ圧子は1000℃でわずか HV600 となる。そこで、圧子の耐用度を十分保証し、同時に圧子接触による試験面温度の低下量を800℃において10℃程度に抑える最も実用的な方法として、硬さ測定前に圧子を試験荷重で試験面に5min 押込んで圧子を予熱する、“圧子予熱法”が通常採用されている。この予熱により、QM では試験荷重 1kgf・試験温度 800℃で圧子は240℃まで温まるが、この程度の温度ではダイヤモンドはほとんど軟化しない³⁵⁾。また、大気中で高温加熱すれば金属中に埋め込まれている部分はよいが露出部の圧子は酸化（蒸発）して痩せてしまうので、高温硬さ試験は真空または不活性ガス雰囲気中で行うことが原則となっている³⁷⁾。

最近では、加熱装置（max. 250℃）を備えた超微小硬さ試験機を用いて、試験力 F と押込み深さ h を逐一計測し $F-h$ 曲線の解析から材料の機械的性質を求めようとする“計装化押込み硬さ試験”で、金属材料とは異なり融点より低い温度で流動性が大きく変化する温度やガラス転移点が存在する高分子材料の熱-温度特性を、簡便に評価する試み（研究・装置開発）も行われるようになってきた⁴⁰⁾。

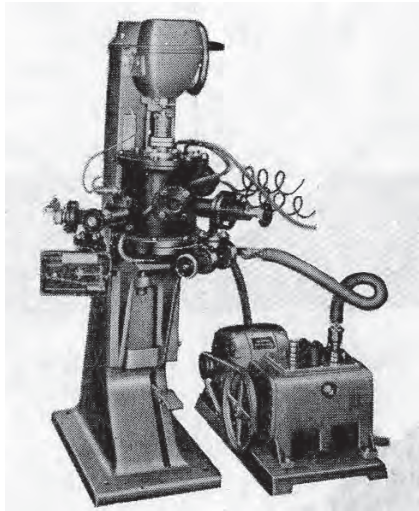


図5.5-1 高温ビッカース硬さ試験機
〔株〕島津製作所³⁷⁾

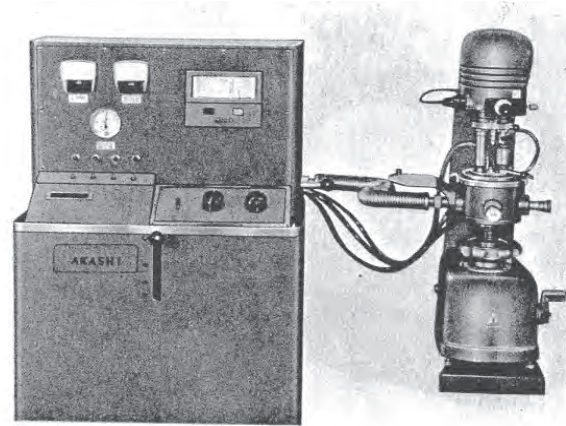


図5.5-2 高温ビッカース硬さ試験機
AVK-HF〔株〕明石製作所³⁷⁾

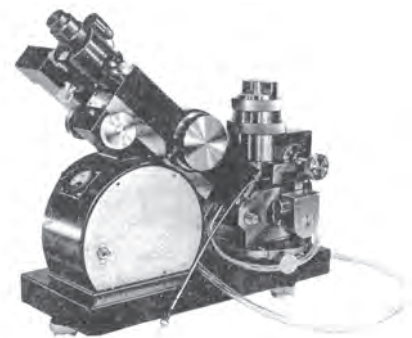
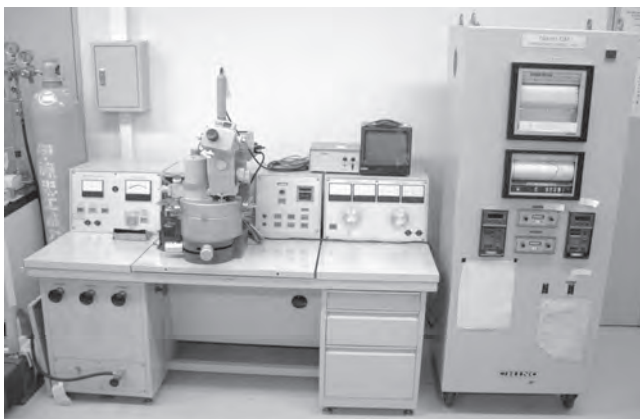
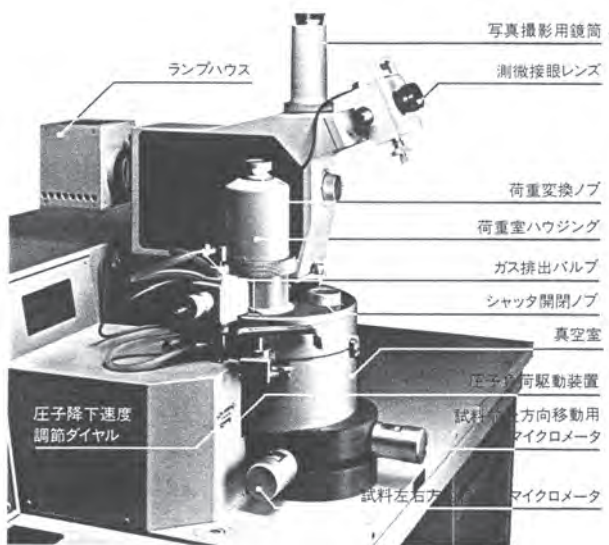


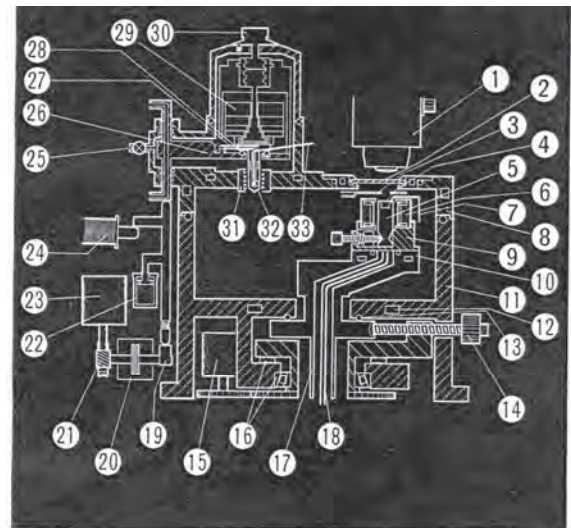
図5.5-3 Nikon高遠式高温微小硬度計
〔日本光学工業(株)〕³⁷⁾



(a) 概観



(b) 高温硬度計・高温顕微鏡



- | | | | |
|----------|----------------|--------------|----------|
| ① 顕微鏡 | ⑩ 加熱路保持台 | ⑲ カム | ⑳ 接点 |
| ② 観察窓 | ⑪ 真空室 | ㉑ クラッチ | ㉒ 負荷荷重 |
| ③ シャッター | ⑫ 冷却水路 | ㉒ ギア | ㉓ 荷重変換ノブ |
| ④ 試料 | ⑬ Oリング | ㉓ オイルダンパー | ㉔ 圧子加熱炉 |
| ⑤ 試料ホルダー | ⑭ 試料移動用マイクロメータ | ㉔ モーター | ㉕ 圧子 |
| ⑥ 試料加熱炉 | ⑮ ステージ回転用モーター | ㉕ ソレノイドストッパー | ㉖ 圧子熱電対 |
| ⑦ 試料熱電対 | ⑯ ステージ回転用ベアリング | ㉖ ガス排出口 | |
| ⑧ 真空室蓋 | ⑰ 冷却排出口 | ㉖ 圧子基板 | |
| ⑨ 試料保持装置 | ⑱ 冷媒供給管 | ㉖ 平行板ばね | |

(c) 硬度計部の構造

図5.5-4 QM型高温顕微硬度計〔日本光学工業(株)〕³⁹⁾

5.6 現場測定対応の携帯型硬さ試験機

*12、*13)

(1) ブリネル硬さ方式の試験機

図 5.6-1 に示す(有) 今井精機の“携帯用ブリネル硬度計”では、標準型ブリネル硬さ試験機で測った結果に近い値が得られ、中空薄肉パイプ以外であれば製品の大きさや材料を問わず簡単に試験できる⁴¹⁾。一方、ブリネル硬さ測定時には通常、圧痕寸法の読取作業に小型顕微鏡を用いるが、作業ラインでの連続測定では作業者の負担が大きく疲労による読取誤差の発生が危惧され、これを回避する装置が求められていた。(株) ロゼフテクノロジーでは 1980 年代後半に圧痕読取装置の開発を始め、試行錯誤の末、“ブリネル圧痕読取装置 LHB-5T”を開発・製品化した[図 5.6-2 参照]。小型化した可動式カメラ(重量 1kg)の導入で現場の作業効率は改善され、カメラの分解能向上で日本海事協会の検定時にも使用が認められるようになったが、モニター、カメラ・光源装置、演算装置からなるシステムの総重量は 23kg と重く、測定時間(形状測定開始から演算結果表示まで)も 3 sec を要した。その後、2007 年(平成 19 年)には後継機の試作を完了し、翌 2008 年(平成 20 年)に“LHB-7T”として製品化された。この装置では、高速画像処理の採用で測定所要時間は 1 sec 以内、総重量は約 8kg に軽量化され、作業現場での使い勝手がさらに改良されたものになっている²⁾。

(2) ショア硬さ方式の試験機

図 5.6-3 には(有) 今井精機の“ハードスコープ PS-1 型、2 型”を、図 5.6-4 には(株) 仲井精機の“ポータブルショア硬度計 PD-1 型”を示す。前者は C 型ショア硬度計、後者は D 型ショア硬度計で JIS に準拠している。ハードスコープはどこでも簡便に使えるように小型・軽量化され、PS-1 型と PS-2 型の使い分けで平面のみでなく曲面や歯車歯底等の特殊形状でも測定できるように設計されている⁴²⁾。また、PD-1 型は大形部材の測定の他に溶接部やレール、橋梁等の硬さ測定にも利用されている^{*12、43)}。なお、PS-1 型は早くも 1949 年(昭和 24 年)に試作され、PD-1 型も 1971 年(昭和 46 年)頃には開発・製品化されている^{*13)}。

図 5.6-5 に示した“EQUOTIP (エコーチップ)”はスイス プロセック社の D. Leeb が 1975 年(昭和 50 年)に考案した携帯型の反発硬さ試験機で、超硬合金球が先端に埋込まれたハンマーをスプリングで試料に当て、その衝突前後の速度比から硬さを求める。“エコーチップ”はプロセック社の製品名称で、衝突前後

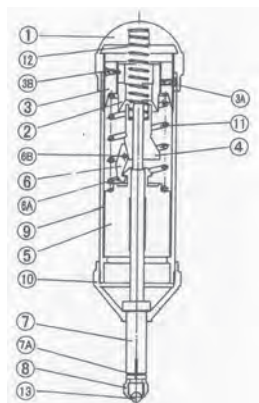
の速度 V_0 、 V_1 は測定筒先端部に内蔵されたコイルの磁束をハンマーが横切る際の電圧変化で測定、その速度比 $V_1/V_0 \times 1000$ を自動的に計算し、“エコーチップ硬さ(L 硬さ)”としてデジタル表示する。また、エコーチップではスプリング負荷につき、ハンマーが自然落下するショア硬度計とは異なり、測定方向に制約がない。ショア硬さ HS とエコーチップ硬さ L はともに反発型の硬さ測定値であり、その相関性は高い⁴⁴⁾。1999 年(平成 11 年)には、ハンマー先端にダイヤモンドまたはタングステンカーバイドのチップを埋込み、さらに小型化された“エコーチップ 2”が市販されている⁴⁵⁾。アメリカでは 1996 年(平成 8 年)に、ASTM がエコーチップを規格化している。なお、2005 年(平成 17 年)頃に(株) ミットヨで製品化された“反発式ポータブル硬度計 HARDMATIC HH-411”もほぼ同様な機能を備えている[図 5.6-6 参照]⁴⁶⁾。

(3) ロックウェル硬さ方式の硬さ試験機

図 5.6-7 には、(有) 今井精機の“携帯用ロックウェル硬度計 PR-11 型”を示す。この硬度計は JIS に準拠し、圧子形状、初荷重、負荷、除荷の測定方法や基本事項は通常の卓上型試験機と同様である⁴⁷⁾。

(4) 押し込み硬さ方式の硬さ試験機

図 5.6-8 に示す JFE アドバンテック(株)の“SONOHARD SH-21”は従来の硬さ試験機とは異なり、試料に生じた圧痕の大きさを顕微鏡で測定する代わりに、ダイヤモンド圧子付振動棒を低荷重で試料に押付け、超音波の縦振動を与えて圧子の侵入深さを測定し、これよりビッカース硬さを求める計測器である⁴⁸⁾。用途としてはプラント、鉄塔・鉄橋等の保守点検に重宝されている。図 5.6-9 には(株) 明石製作所の“アカシ・ポータブル硬度計”を示す。このシリーズの試験機は試料に本体を押付け、圧子(100° 円錐のダイヤモンド)の侵入深さから硬さを求めるものである。“HH-100 シリーズ”の原型となった純機械式の“PHT 型”は 1958 年(昭和 33 年)に所定のダイヤモンド圧子が完成し、製品化されている^{*13)}。



①押し当てキャップ、②コンスリーブ、③アジャストスリーブ、④フックホルダー、⑤ハンマー、⑥フック、⑦主軸、⑧ボールホルダー、⑨器筒、⑩ガードキャップ、⑪ハンマー用バネ、⑫戻しバネ、⑬φ5鋼球

[測定原理] ・JIS 試験機に準拠

[本体寸法] 長さ：185mm、太さ：44mm、重量：1.8kg

図5.6-1 携帯用ブリネル硬度計[(有)今井精機]⁴¹⁾



(a) LHB-5T



(b) LHB-7T

[LHB-7T の仕様]

- ・撮像装置：CCD カメラ
- ・倍率：固定(圧痕径φ2～3、φ3～6mm 対応)
- ・測定精度：±1/100mm 以内
- ・測定時間：1 秒以内
- ・試験荷重：980.7N～29.42kN
- ・鋼球の直径：φ5.10 mm
- ・データ表示：圧痕径、硬さ値
- ・重量：測定ヘッド 570g、コントロールボックス 7.3kg

図5.6-2 ブリネル圧痕読取装置 LHB-5T、7T [(株)ロゼフテクノロジー]²⁾



(a) PS-1 (b) PS-2

[測定原理] JIS 試験機(C 型)に準拠		
[仕様]		
型式	PS-1	PS-2
測定対象	汎用：平面、凸曲面	万能型：歯車、歯底等の特殊形状
本体寸法	250×φ25 mm	256×φ25 mm
本体重量	280g	285g
測定硬さ	ショア硬さ(HS 0～120)	
表示	目測 (跳ね上りの最高点)	
測定精度	HS30,60 で±1.0, HS90 で±1.5	

図5.6-3 ハードスコープ PS-1型、2型[(有)今井精機]⁴²⁾

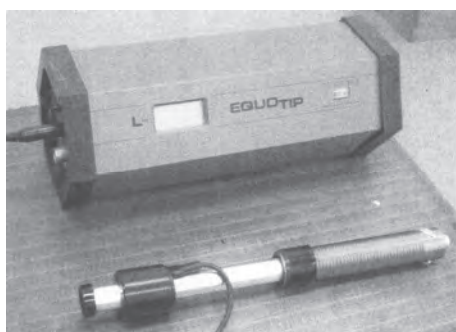


図5.6-4 ポータブルショア硬度計 PD-1型[(株)仲井精機]⁴³⁾

[測定原理]

- ・JIS 試験機(D 形)に準拠
 - ・ダブル式口金：ギヤ歯底、小さい谷部、凹面部の試験には外側の口金をはずして使用
- [主要寸法]
- ・全高さ：245mm
 - ・ダイヤル直径：55mm
 - ・計測筒直径：28mm
 - ・重量：770g

[エコーチップ 2 の仕様] ・インパクト装置：D 形 ・インパクトエネルギー：11Nmm ・テストチップ 径：3mm ・重量：75g ・1996 年 ASTM 規格化



(a) エコーチップ



(b) エコーチップ 2

図5.6-5 EQUOTIP Hardness Tester(エコーチップ) [スイス PROCEQ社製]^{44, 45)}

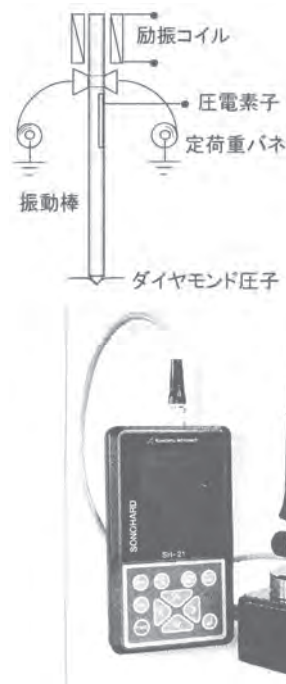
[測定原理]

- ・1975 年、スイスのリーフ (Leeb) が考案
 - ・リーフ硬さ HL は、インパクトボディの反発速度を打撃速度で割った商を 1000 倍した数値
- $$HL = \frac{\text{反発速度 } V}{\text{打撃速度 } V_0} \times 1000$$



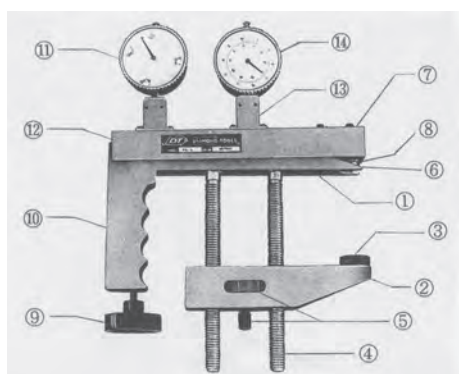
図5.6-6 反発式ポータブル硬度計 HARDMATIC
HH-411[(株)ミットヨ]⁴⁶⁾

- [測定原理]
- ・JIS 試験機(D 形)に準拠
- [仕様]
- ・検出器:インパクタ先端に超合金使用
 - ・表示範囲: Hv43~950、HB 20~894、HRC 19.3~68.2、HRB 13.5~101.7、HS 13.2~99.3、HL 1~999



- [測定原理]
- ・ダイヤモンド圧子付振動棒を試料表面に押し付け、振動棒に超音波縦振動を与え、硬さ測定(振動棒の共振周波数から硬さ換算)
- [仕様]
- ・測定圧子:マイクピッカス用ダイヤモンド圧子
 - ・測定荷重:標準 19.6N(2kgf)
 - ・測定範囲: Hv 50~999、HS20.0~99.9、HRC10~70、HB85~550
 - ・外形寸法:プローブ φ40×164(L)mm、表示ユニット 97(W)×50(D)×170(H)mm

図5.6-8 ハンディ硬さ計 SONO HARD
SH-21[JFEアドバンテック(株)]⁴⁸⁾



- ①上部クランプ、②下部クランプ、③支持アングル、④調節ネジ、⑤ギザギザ付ノブ、⑥圧子、⑦圧子締めネジ、⑧負荷バー、⑨ 荷重ネジ、⑩ハンドル、⑪荷重ダイヤル指示計、⑫指示計支え、⑬指示計保持台座、⑭侵入計測指示計

- [測定原理]
- ・JIS 試験機に準拠
 - ・荷重ネジ⑨を回し、負荷バー⑧を介して圧子に負荷
 - ・荷重ダイヤル指示計⑪と侵入計測指示計⑭で硬さ値を読み取る
- [仕様]
- ・基準荷重: 10kgf
 - ・試験荷重: HRC 150kgf, HRA 60kgf (ダイヤモンド圧子)、HRB 100kgf(鋼球圧子)
 - ・試料: 最大高さ 110、奥行 55mm

図5.6-7 携帯用ロックウェル硬度計 PR-1型 PD-1型
[(有)今井精機]⁴⁷⁾



(a) PHT

(b) HH-120, 140

図5.6-9 アカシ・ポータブル硬度計[(株)明石製作所、現.(株)ミットヨ]^{13, 49)}

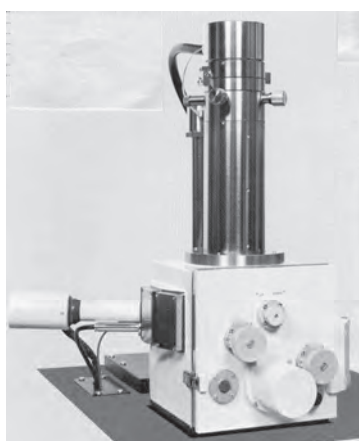
[測定原理] 圧子の侵入量から硬さ値を換算する		
[仕様]		
型式	HH-120	HH-140
・システム構成	本体表示部一体	本体表示部分離
・質量、 外形寸法	約 950g、136× 100×143mm	本体: 約 800g、 表示部: 約 200g
・圧子	100° 円錐ダイヤモンド圧子	
・押付け力	約 147.1N (15kgf)	
・表示範囲	Hv32~999、HB 81~767、HRC 0~ 68、HRB41~110、HS14~101.3	

5.7 超微小硬さ試験機(含・ナノインデンテーション試験機)^{*11、*14~16)}

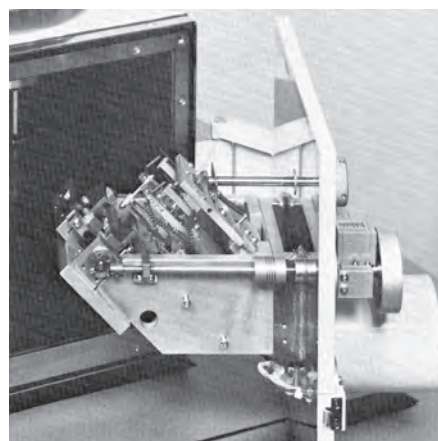
近年、マイクロビッカースによる微小硬さ試験はその試験力が小さいことから薄膜材料や微小部品の材料特性評価方法として注目されているが、ビッカース硬さ試験では形成されたくぼみの対角線長さを計測顕微鏡で測定できることが前提となるため、その試験力に下限がある。このような事情から1985年(昭和60年)に(株)明石製作所は、ファインセラミックスや薄膜の硬さ測定用に走査型電子顕微鏡の試料室に超低荷重の荷重機構を組み込み、微小ビッカース圧痕を観察・測定する“超微小硬度計(SMH-100型)”を開発した〔図5.7-1 参照〕⁵⁰⁾。また、1992年(平成4年)には松沢精機(株)が、釣合いを取った精密天秤に押込力(試験荷重)発生用の分銅を付加する荷重機構でビッカースくぼみを形成する“超軽荷重微小硬度計(MXT-UL型)”を開発している〔図5.7-2 参照〕。この硬度計では、磁界中に置かれた導体に電流を流して推力を発生させるボイスコイル型リニアモーターをその駆動源に採用したことで電流制御により最適の負荷・除荷速度が得られ、照明等光学系の新設計により圧痕対角線長さを光学顕微鏡測定限界に近い1~1.5 μm のくぼみまで0.01 μm 単位で測定できる⁵¹⁾。一方、最近

は、より小さな試験力での硬さ試験を実現する手段として、微小試験力を加えながらくぼみ形成時の圧子押し込み深さを逐一計測し、得られた試験力と深さの関係から硬さや材料特性を評価する“計装化押し込み試験”が注目されている。この試験方法は2002年(平成14年)にISO 14577-1「計装化押し込み硬さおよび材料パラメータ」として規格化され、その中でも押し込み深さが概ね1 μm 以下の非常に小さな試験は、慣用的に“超微小硬さ(ナノインデンテーション)試験”と称され、試験機市場においても認知されるようになってきた^{34,52)}。図5.7-3には、典型的な試験力-押し込み深さ曲線とISO 14577-1の付録Aに求め方が記述されている硬さと材料パラメータを示す⁵³⁾。

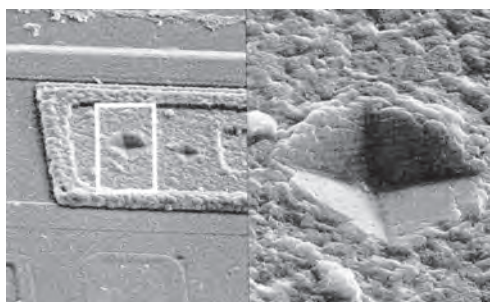
ナノインデンテーション法では押し込み荷重と圧子押し込み深さの関係を連続的に計測し、これらの関係や押し込み荷重除荷後の圧子押し込み深さ等から硬さ値を求める。また、この他に試料の弾性回復量や縦弾性係数等に関する情報も同時に得ることが可能である。多くの場合、圧子にはダイヤモンド三角錐圧子(Berkovich圧子)を用いる⁵⁴⁾。その最大理由は、ビッカース圧子(対面角136°のダイヤモンド四角錐圧子)ではその4面を圧子先端で1点に合致させることが非常に困難(JISでは対向面により生じる稜線長さを0.5 μm 以下と規定)なのに対し、三角錐圧子では3面を理論的に1点



(a) 明石走査型電子顕微鏡



(b) 試料室内蔵の超低荷重負荷装置



(b) デバイス微細パターン表面での圧痕例

・超低荷重の荷重機構を走査型電子顕微鏡の試料室に組み込み、光学顕微鏡では読取り困難な微小くぼみを観察測定

〔主な仕様〕

- ・試験荷重：0.1~2gf (計5段階、0.01gfも可能)
- ・重錘の精度：0.1~2gfで $\pm 2\%$ ・圧子：ビッカース
- ・速度制御：電磁式 ・荷重保持時間：5~30 s
- ・試料微動：10 $\times$ 10mm (微動最小目盛 0.01mm)

図5.7-1 明石超微小硬度計 SMH-100型〔(株)明石製作所〕⁵⁰⁾

で交わるように製作することが可能なことによる。ナノインデンテーション硬さ HN は、三角錐圧子の稜間角度が 115° の場合は(1)式で、 100° の場合には(2)式で算定される^{*15)}。

$$HN_{115} = 3.858P/h^2 \quad (1)、\quad HN_{100} = 15.018P/h^2 \quad (2)$$

ここで、 P : 押し込み荷重(設定荷重) (mN)、 h : 押し込み深さ (μm)

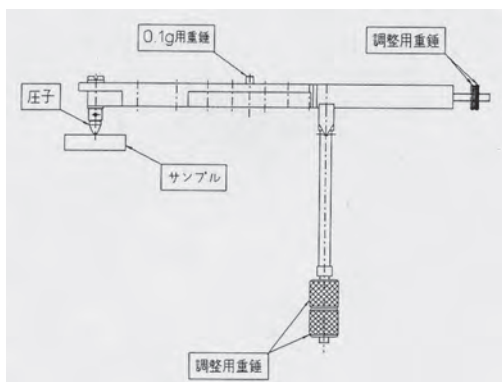
理化学研究所では1983年(昭和58年)4月に佐田

登志夫理事と金沢憲一、河野彰夫の両研究員の3名で新型超微小硬度計の開発を開始し、化学天秤の先にダイヤモンド圧子を付けた構造で負荷は電磁コイル式、圧子侵入深さは変位センサー(差動トランス)で直読、荷重-侵入深さ曲線を連続出力する基本構成を考案し、同年夏頃に(株)島津製作所に試作を依頼した。両者の共同研究で、(株)島津製作所は負荷用電磁石

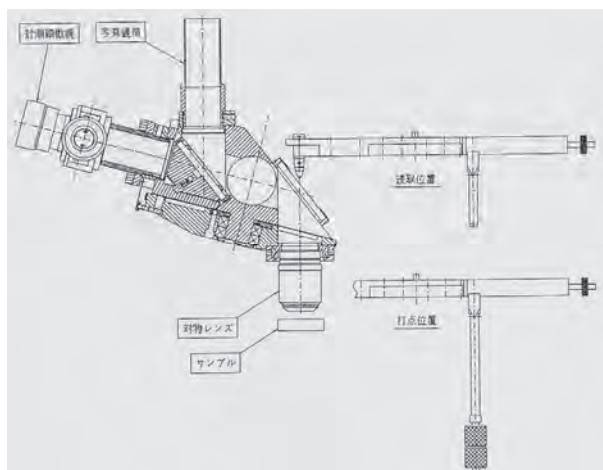


(a) 硬度計の外観

[主な仕様]	
・試験荷重: 0.1~50gf (8段階自動切り換え)	
・荷重機構: ボイスコイルモーターによる自動負荷・除荷・解除 (負荷速度 30,40,50 $\mu\text{m/s}$ 、荷重保持時間 5~50 s)	
・圧子~計測レンズ~観測レンズ: 自動切り換え	
・顕微鏡拡大率(総合): 計測用 $\times 1000$ 、観察用 $\times 100$	
・計測範囲: 最大長さ 100 μm 、最小計測単位 0.01 μm	
・データ表示: 硬さ値 最大5桁、最小 0.1 硬度	

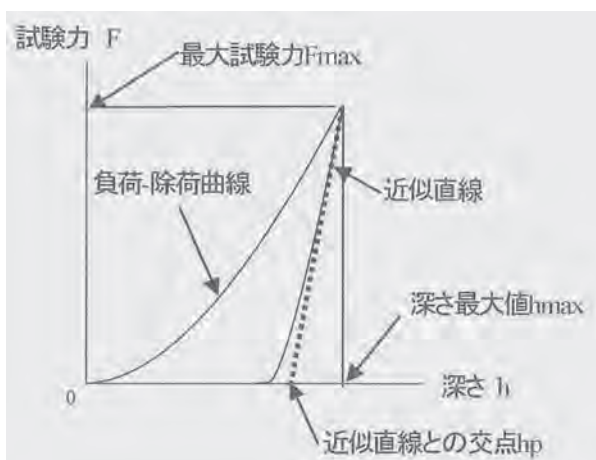


(b) 天秤機構



(c) 顕微鏡切換え(精密天秤の負荷・除荷機構が上方に移動)

図5.7-2 超軽荷重微小硬度計 MXT-UL型[松沢精機(株)]⁵¹⁾



典型的な試験力-押し込み深さ曲線

[ISO14577-1の付録Aに求め方が記述されている硬さ、材料パラメータ]

- ① マルテンス硬さ HM
- ② 試験力深さ勾配から求めるマルテンス硬さ HM_s
- ③ 押し込み硬さ H_{it}
- ④ 押し込み弾性率 E_{it}
- ⑤ 押し込みクリープ C_{it}
- ⑥ 押し込み仕事比率 η_{it}

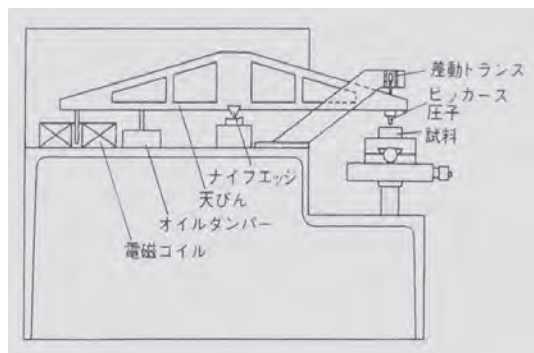
(注) 硬さのみでなく、弾性率や仕事等の材料パラメータが定義されていることが特長

図5.7-3 ISO規格14577-1(計装化押し込み硬さおよび材料パラメータ)⁵³⁾

に流れる電流と差動トランスの出力電圧を A-D 変換してマイコン処理、硬さ測定の全自動化を可能にした試験機に仕上げ翌年 3 月に理化学研究所に納入、1985 年（昭和 60 年）には荷重範囲 0.01 ～ 50gf、押し込み深さ 0.01 ～ 5 μm の“島津ダイナミック微小硬度計（DUH-50）”として製品化した [図 5.7-4 参照]。この硬度計は“世界初のナノインデンテーション硬さ試験機”と言えるもので、その後、1988 年（昭和 63 年）に“DUH-200 型”が、2007 年（平成 19 年）には“DUH-211 型”が後継機種として開発されている^{53,55～58}。

1993 年（平成 5 年）には日本電気（株）が 0.1 μm レベルの薄膜の硬さを測定できる“薄膜硬度計”を開発・製品化している [図 5.7-5 参照]。この硬度計では、

圧子は押し込み駆動部である圧電アクチュエータの先端部に取付けられその印加電圧で押し込み速度を制御し、圧電アクチュエータ駆動時にはアクチュエータ連動の変位計プローブと鏡との距離変化を圧子押し込み深さとして記録する⁵⁹。その後、1999 年（平成 11 年）頃には、計量研究所は光ファイバ干渉計を備えた試験機を、（株）ナノテックと金属材料研究所は AFM（原子間力顕微鏡）を組込んだ試験機を開発している^{60～62}。（株）明石製作所もその頃にナノインデンテーション試験機を製品化している^{63,64}。また、（株）エリオニクスは 1993 年（平成 5 年）に長岡技術科学大学の田中紘一教授（元・金属材料研究所）と共同研究を開始し、1995 年（平成 7 年）に“ENT-1100 型超微小押し込み硬さ試験



(a) 理化学研究所で考案した基本構成⁵⁵⁾



[主な仕様]

- ・負荷：電磁コイル式
- ・圧子侵入深さ測定：差動トランス
- ・荷重範囲：0.01～50gf
- ・押し込み深さ測定範囲：0.01～5 μm

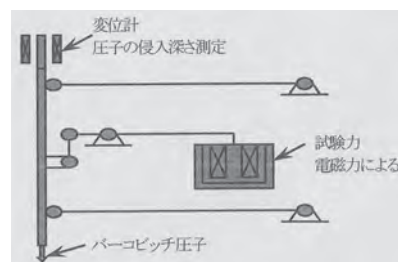
(b) DUH-50 型⁵⁶⁾



[主な仕様]

- ・負荷方式：電磁コイル式
- ・荷重範囲：0.01～200gf
- ・圧子押し込み深さ測定法：差動トランス式
- ・圧子押し込み深さ測定範囲：0～10 μm
(測定最小単位：0.01 μm)
- ・くぼみ対角線長さ測定器：オプティカルエンコーダ
(測定最小単位：0.1 μm)

(c) DUH-200 型⁵⁷⁾



測定原理

(d) DUH-211 型^{53,58)}

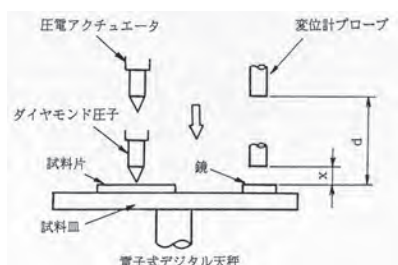
[主な仕様]

- ・試験力：0.1～1961N
(0.01～200gf)
(測定最小単位 0.196 μN)
- ・押し込み深さ測定：0.010 μm
(測定最小単位 0.1nm)
- ・圧子：対稜角 115° 三角錐
圧子（バーコピッチ圧子）
- ・顕微鏡倍率：500 倍
(対物 50 倍、接眼 10 倍)
- ・試験の種類：① 圧子押し込み試験、② 荷重－除荷試験、③ 繰り返し試験、④ 押し込み深さ設定試験、⑤ 押し込み深さ設定荷重－除荷試験、⑥ ステップ荷重試験、⑦ ステップ荷重－除荷試験

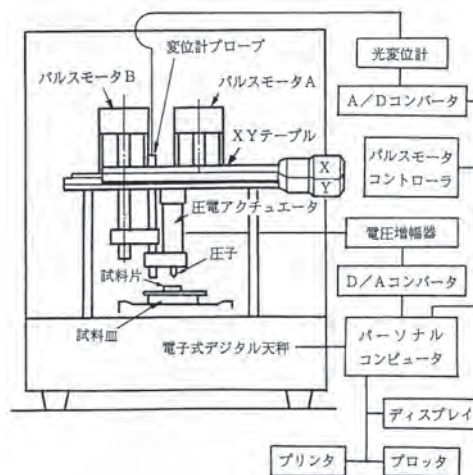
図5.7-4 ダイナミック超微小硬度計[(株)島津製作所]



(a) 硬度計の外観



(b) 電子式デジタル天秤

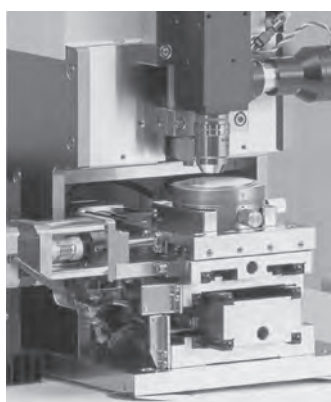


(c) 装置の構成

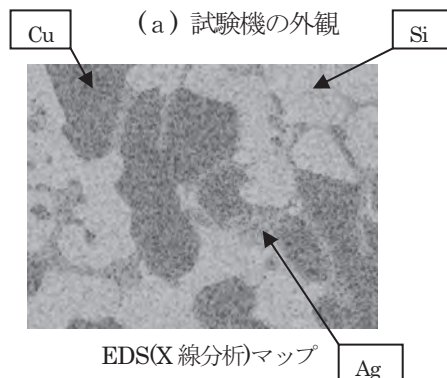
図5.7-5 薄膜硬度計 MHA-400型[日本電気(株)]⁵⁹⁾



(a) 試験機の外観



(b) 計測部



EDS(X線分析)マップ



硬さマップ



重ね合せ図(分析+硬さ)

(c) 硬さマップ測定例

図5.7-6 超微小押込み硬さ試験機 ENT-1100a型[(株)エリオニクス]^{66,67)}

[主な仕様]

- ・試験荷重：10mgf～100gf (2mgf も可)
- ・荷重制御：電磁式(最小荷重ステップ 4 μ gf)
- ・圧子：バーコビッチ三角錐圧子
- ・圧子の変位測定試験範囲：0～20 μ m
静電容量式 (分解能 0.3 μ m)
- ・光学系：対物レンズ 20 倍、接眼 CCD カメラ
- ・測定位置決め精度： $\pm 2 \mu$ m(X,Y)
- 制御：5 相ステップングモーター
- ・防振台：バネ式(固有振動数 0.5Hz 以下)
- ・温度：シールドケース内を 0.1°C 単位で管理

機”を、2002年（平成14年）にその上位機種として“ENT-2100型”を、2003年（平成15年）には産業技術研究所との連携でISO準拠の解析ソフトを開発し、翌2004年（平成16年）にENT-1100型のリニューアル機“ENT-1100a型”を開発・製品化している。図5.7-6にはENT-1100a型試験機の外観と硬さマップ測定例を示す。この試験機では測定位置決め装置に半導体パターン描画装置（ステッパ）の位置決め機構を採用して位置決め精度の向上を図っており、EDS（X線分析）画像と硬さマップを重ね合わせることで金属組織と硬さの対応も高精度に表示・判定できるようになった^{65～67)}。

なお、ナノインデンテーション硬さと従来のビッカース硬さとの互換性については現在様々な議論がなされている段階で、未だその理論体系の確立には至っていない。これは今後の課題でもある。

5.8 基準硬さ試験機^{*1)}

硬さ測定値に工業量としての普遍性を与えるには、硬さ基準片を用いて硬さ試験機を検定する必要がある。この基準片に付せられている基準値を得るための試験機が“基準硬さ試験機”である。なお、基準片の基準値を決定する試験機はJIS規定を満足する試験機であり、基準硬さ試験機の名称はあくまで試験機メーカーによる呼称（商品名の類）と考えるべきものである。

5.8.1 東京都立工業奨励館（現・東京都立産業技術センター）

（1）基準ビッカース硬さ試験機（明石製作所＋都立工業奨励館）

1943年（昭和18年）、都立工業奨励館に設置された。実荷重方式で5～50kgfまでの試験荷重が利用でき、負荷と除荷は油圧制御による[図5.8-1 参照]。同所では1980年代半ば（昭和60年）頃まで、本機を用いて硬さ基準片の基準値決定の依頼試験を実施していた。

（2）試作基準ロックウェル硬さ試験機（明石製作所＋都立工業奨励館）

実荷重方式による基準ロックウェル硬さ試験機の試作が、1951年（昭和26年）頃から都立工業奨励館と明石製作所の協力で試みられ、1953年（昭和28年）、都立工業奨励館に試作試験機が設置された[図5.8-2 参照]。同型機は東京大学工学部と明石製作所にも設置され、ロックウェル硬さ基準片確立のための基礎研究に使用された。しかし、一般使用のウィルソン型試験機と負荷機構が異なり、材料の塑性流動過程の抵抗状態

も異なることから測定値の相違が問題となり、本試作機は研究段階にとどまり、実用化には至らなかった。

（3）基準ロックウェル硬さ試験機（明石製作所＋都立工業奨励館）

現在のJISロックウェル硬さ基準片の規定を満足する基準試験機で、てこ式（てこ長さは一般試験機の2倍）により負荷を与え、負荷速度はオイルダンパーで制御する[図5.8-3 参照]。デジタル表示機で、ロックウェル硬さとロックウェルスーパーフィシャル硬さの両用機である。本試験機は、圧子をビッカース圧子に交換し顕微鏡と試料移動テーブルを増設することで、ビッカース硬さの測定も可能である。

（4）基準ブリネル硬さ試験機（明石製作所）

1970年（昭和45年）には基準ロックウェル硬さ試験機と同様の考え方で、基準ブリネル試験機が開発・市販された（荷重てこ比20倍、オイルダンパーで負荷速度制御、荷重範囲250～3000kgf）。荷重と圧子軸系には摩擦力がほとんど作用しない構造で、荷重保持時間は任意設定が可能、自動除荷方式を採用している。

5.8.2 計量研究所（現・産業技術総合研究所）

（1）標準硬さ試験機（計量研究所）

1958年（昭和33年）に、荷重の組合せでロックウェル硬さとビッカース硬さの両方を測定できる標準硬さ試験機が開発された。重錘を水槽に浮かべ、浮力の利用により荷重が円滑に負荷され、また、顕微鏡により圧子押込み量が測定できる特長を持つ[図5.8-4 参照]。

（2）標準反発硬さ試験機（計量研究所）

1969年（昭和44年）に3ヶ国の国際比較に使用した反発硬さ試験機で、試験条件はD型試験機に準拠し、ハンマ先端の形状を精密に評価、ハンマの跳ね上がり高さを跳ね上がり所要時間から求める機能を具備している[図5.8-5 参照]。なお、ハンマの反発高さを直接測定するために試作した装置の構成図によれば、ハンマ上端に差動変圧器のフェライトコアを接着し、ハンマが跳ね上がった頂点でコアがそのほぼ中央にくるように差動変圧器のコイルを配置、その出力変化をブラウン管オシロスコープに表示・記録して頂点の高さを求めている^{69～71)}。

（3）反発ショア硬さの標準試験機（計量研究所）

1983年（昭和58年）に開発した試験機で、空気軸受により自由に運動させ、跳ね上がり高さの時間計測と光学的検出を併用して、試験の再現性を高めた[図5.8-6 参照]。

（4）ビッカース硬さ標準試験機（明石製作所＋計量研究所）

1995年（平成7年）に開発したビッカース硬さ標

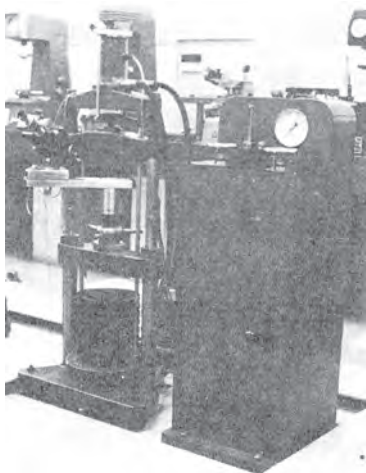


図5.8-1 基準ビッカース硬さ試験機^{*1)}

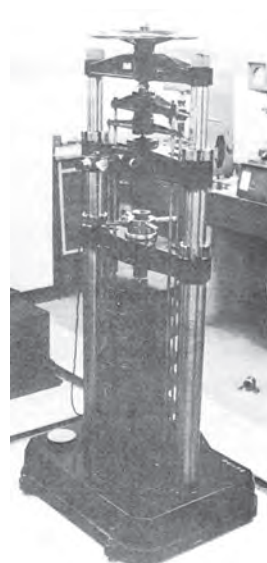


図5.8-2 試作基準ロックウェル硬さ試験機^{*1)}



図5.8-3 基準ロックウェル硬さ試験機^{*1)}

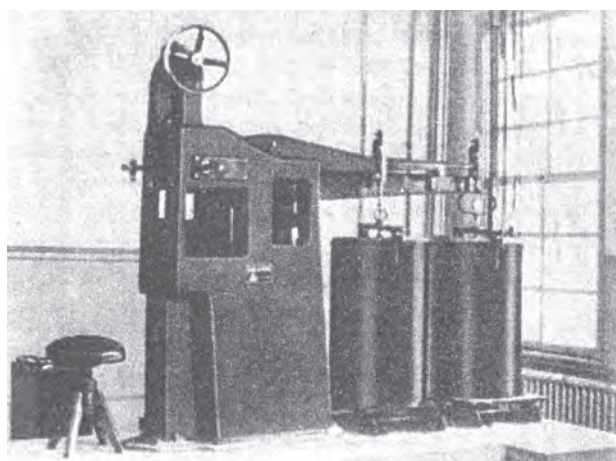
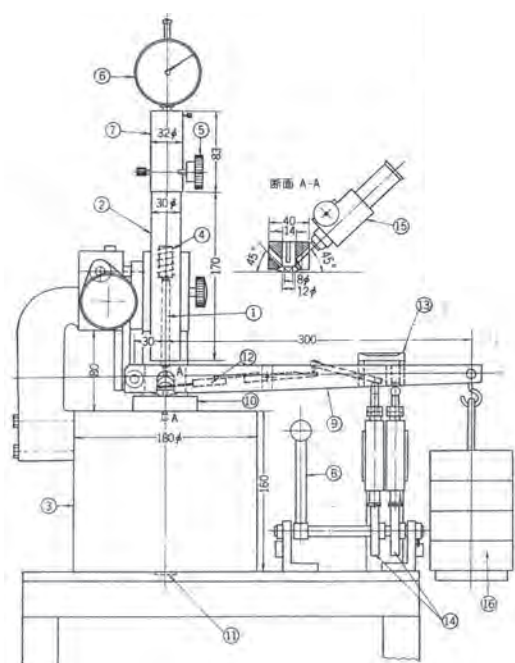
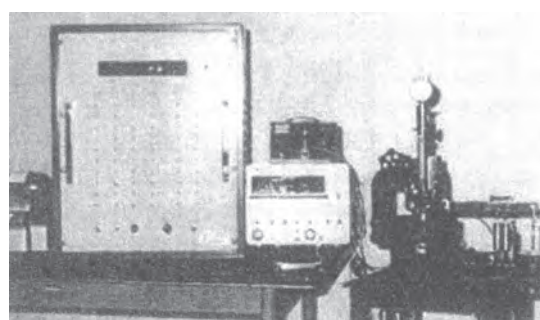


図5.8-4 標準硬さ試験機⁶⁸⁾



(a) 試験機本体の概略図

- ① ハマー、② 計測筒本体、③ 受台、④ 電磁石、⑤ ハンドル、
⑥ ダイヤルゲージ、⑦ 計測筒ヘッド、⑧ ハンドル、⑨ レバー、
⑩ 試料、⑪ 圧電振動子、⑫ フォーク、⑬ 水準器、⑭ カム、
⑮ 顕微鏡、⑯ おもり



(b) 試験機の外観

図5.8-5 標準反発硬さ試験機⁷¹⁾

準機で、荷重負荷にてこの方式を採用している。圧子によりつけられたくぼみの対角線長さを CCD カメラでくぼみ画像とし、画像処理により安定した測定を可能にした [図 5.8-7 参照]。

(5) ロックウェル硬さ標準機 (明石製作所 + 計量研究所)

1996 年 (平成 8 年) に開発したロックウェル硬さ標準機で、力はこの方式により負荷され、また、ロードセ

ルと高精度のレーザホログラジを内蔵、力と押し込み深さを連続的に測定できる構造となっている [図 5.8-8 参照]。
(6) “圧子形状測定装置” (ミットヨ・アカシ + 計量研究所)

2000 年 (平成 12 年) に開発した圧子形状測定装置で、レーザ光によりロックウェル硬さ圧子の先端形状を測定する。また、光干渉縞を画像処理する機能を持ち、圧子先端形状の 3 次元的な把握も可能である [図 5.8-9 参照]^{71~73)}。

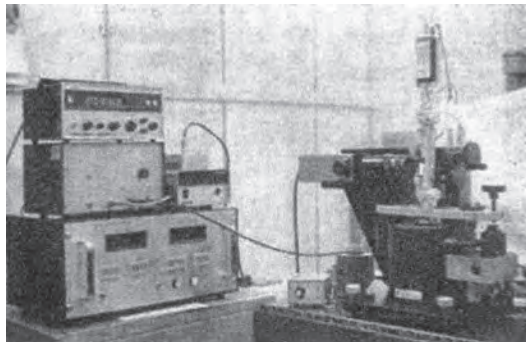


図5.8-6 反発ショア硬さ標準試験機⁶⁸⁾

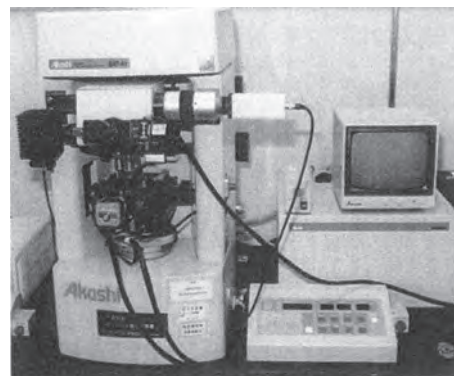


図5.8-7 ビッカース硬さ標準機⁶⁸⁾



図5.8-8 ロックウェル硬さ標準機⁶⁸⁾

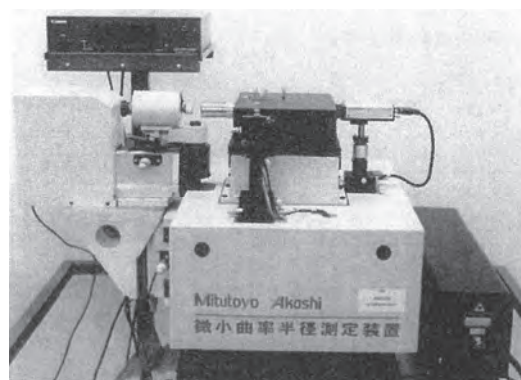


図5.8-9 圧子形状測定装置⁶⁸⁾

[参考文献]

- * 1) 材料試験技術研究会、日本試験機工業会 共編：「日本における試験機のあゆみ」、P. 18～31 (1982) [昭和 57 年]
- * 2) 寺沢正男：“設計資料提供から材料の本質追求へ”、金属、84/5 臨時増刊号、P. 1～4 (1984) [昭和 59 年]
- * 3) 岩崎昌三：“新しい硬さ試験機”、材料試験技術研究会、「現場の硬さ試験」講習会テキスト、P. 4-1～4-22 (1984) [昭和 59 年]、P. 4-1～4-24 (1989) [平成 1 年]
- * 4) 中村雅勇：“硬さ試験の理論とその応用”、工業調査会刊、P. 11～31 (2007) [平成 19 年]
- * 5) カタサ研究会ロールカタサ分科会編：“圧延ロールのかたさ測定”、P. 1～50 (1965) [昭和 40 年]
- * 6) 材料試験技術研究会ロールカタサ分科会編：“圧延ロールの硬さ測定”、P. 1～51 (1978) [昭和 53 年]
- * 7) 日本材料試験技術協会ロール硬さ委員会編：“(改訂版) 圧延ロールの硬さ測定”、P. 1～82 (1986) [昭和 61 年]
- * 8) 飯塚幸三：“シヨアかたさ目盛の精度向上に関する研究”、計量研究所報告、Vol. 20、No. 4、P. 1～131 (1971) [昭和 46 年]
- * 9) 山本 卓：“硬さの相似則と基準片（後編）”、金属、Vol. 77、No. 1、P. 74～78 (2007) [平成 19 年]
- * 10) 大窪 茂：“ロックウェル硬さ試験機のルーツについて”、材料試験技術、Vol. 27、No. 2、P. 162～166 (1982) [昭和 57 年]
- * 11) 硬さ研究部会報告：“第 40 回 硬さに関する懇話会”、材料試験技術、Vol. 50、No. 2、P. 100～106 (2005) [平成 17 年]
- * 12) 硬さ研究部会報告：“第 41 回 硬さに関する懇話会”、材料試験技術、Vol. 51、No. 3、P. 215～218 (2006) [平成 18 年]
- * 13) 大窪 茂：“日本における硬さ試験機ダイヤモンド圧子ハンマのルーツについて（3）”、材料試験技術、Vol. 30、No. 1、P. 72～77 (1985 年) [昭和 60 年]
- * 14) 福田勝己：“超微小硬さ試験”、材料試験技術、Vol. 43、No. 1、P. 11～15 (1998) [平成 10 年]
- * 15) 福田勝己：“ナノインデンテーション法による表面評価”、材料試験技術、Vol. 47、No. 1、P. 2～7 (2002) [平成 14 年]
- * 16) 山本靖則：“超微小硬さの現状と動向”、日本材料試験技術協会「現場の硬さ試験（基礎からその活用まで）」講習会テキスト、P. 3-1～3-22 (2007) [平成 19 年]

[注]

- 1) 大窪 茂：“日本における硬さ試験機ダイヤモンド圧子ハンマのルーツについて（1）、（3）、（4）”、材料試験技術、Vol. 29、No. 3、P. 208～210 (1984) [昭和 59 年]、Vol. 30、No. 1、P. 72～77、No. 2、P. 172～176 (1985) [昭和 60 年]
- 2) 佐藤 忠：“ブリネル圧痕読取装置 LHB-7T”、日本試験機工業会、TEST、Vol. 8、P. 22～23 (2008) [平成 20 年]
- 3) (株) 東京衡機製造所技術資料：“ブリネル硬さ試験機”、P. 1～2 (1970) [昭和 45 年]
- 4) 井谷 隆雄：“自動ブリネル硬さ試験機”、材料試験技術研究会、「硬さ試験の自動化」講習会テキスト、P. 6-1～6-15 (1977) [昭和 52 年]
- 5) 岩崎昌三：“自動ブリネル硬さ試験機”、材料試験技術、Vol. 29、No. 2、P. 139～142 (1984) [昭和 59 年]
- 6) 羽土光三：“シヨア硬さ試験機と共に 40 年”、材料試験技術、Vol. 18、No. 2、P. 4～7 (1973) [昭和 48 年]
- 7) 原 保助：“シヨア硬さ試験の自動化”、材料試験技術研究会、「硬さ試験の自動化」講習会テキスト、P. 7-1～7-8 (1977) [昭和 52 年]
- 8) 荒瀬 昇：“電子硬度計”、熱処理、Vol. 23、No. 6、P. 379～382 (1983) [昭和 58 年]
- 9) 荒瀬 昇：“シヨア硬度計 C 型、D 型と HS-E 電子シヨア硬度計による硬さ値の比較試験”、材料試験技術、Vol. 29、No. 1、P. 28～32 (1984) [昭和 59 年]
- 10) 大窪 茂：“日本における硬さ試験機ダイヤモンド圧子ハンマのルーツについて（2）”、材料試験技術、Vol. 29、No. 4、P. 276～280 (1984) [昭和 59 年]
- 11) 吉澤武男：“ロックウェル硬度について”、日本機械学会論文集、Vol. 14、No. 46、P. 37～55 (1947) [昭和 22 年]
- 12) (株) 明石製作所：技術資料「明石の硬度計」、P. 1～3 (1968) [昭和 43 年]
- 13) (株) 明石製作所：技術資料「明石硬度計」、P. 1～9 (1977) [昭和 52 年]
- 14) 松沢弘幸：“ロックウェル硬さ試験の自動化”、材料試験技術研究会、「硬さ試験の自動化」講習会テキスト、P. 8-1～8-17 (1977) [昭和 52 年]
- 15) 石川泰夫：“硬さ試験の自動化”、材料試験技術研究会、「現場の硬さ試験」講習会テキスト、P. 5-1～5-13 (1984 年) [昭和 59 年]、P. 4-1～4-24 (1989) [平成 1 年]
- 16) 岩崎昌三：“デジタルロックウェル硬度計”、材料試験技術、Vol. 33、No. 3、P. 199～200 (1988) [昭和 63 年]
- 17) (株) 明石製作所：技術資料「明石自動ロックウェ

- ルスーパーフィシャル硬度計 AHT-S」、P. 1 ～ 2 (1983 頃) [昭和 58 年頃]
- 18) 川添 勝：“ロックウェル硬さ試験機 WiZhard ”、材料試験技術、Vol. 48、No. 4、P. 272 ～ 274 (2003) [平成 15 年]
 - 19) (株) 明石製作所：技術資料「DIAMOND PYRAMID HARDNESS TESTER」、P. 1 ～ 27 (1943 頃) [昭和 18 年頃]
 - 20) 西畑三樹男：“解説 微小硬度計”、通研月報、Vol. 19、No. 12、P. 515 ～ 519 (1956) [昭和 31 年]
 - 21) 寺沢正男：“硬さと柔らかさ”、日本材料試験技術協会、創立 40 周年特別記念号、P. 16 ～ 18 (1996) [平成 8 年]
 - 22) 寺沢正男、本多達三、石川忠男、今泉幸雄、河村忠治：武蔵工業大学機械材料研究室資料「微小硬度計の設計及び製作」P. 1 ～ 44 (1972) [昭和 23 年]
 - 23) 大洋テスター(株)：技術資料「寺沢式微小硬度計」、P. 1 ～ 2 (1949) [昭和 24 年]
 - 24) 大洋テスター(株)：技術資料「寺沢式 M- II 型微小硬度計」、P. 1 (1972) [昭和 47 年]
 - 25) (株) 弥満和製作所：技術資料「(やまわニュース) TY 式微小硬度計」、P. 1 ～ 2 (1960) [昭和 35 年]
 - 26) 岩崎昌三：“微小硬さ試験機関連の開発経過 (明石製作所の 1980 年まで)”、日本材料試験技術協会、硬さ研究部会「第 40 回 硬さに関する懇話会」資料、P. 1 ～ 4 (2005) [平成 17 年]
 - 27) (株) 島津製作所：技術資料「紫野工場 60 年の歩み」、P. 1 ～ 2 (2004) [平成 16 年]
 - 28) 岩崎昌三：“自動読取ビッカース硬度計”、材料試験技術研究会、「硬さ試験の自動化」講習会テキスト、P. 5-1 ～ 5-10 (1977) [昭和 52 年]
 - 29) 岩崎昌三：“微小硬さ試験における問題点”、材料試験技術、Vol. 34、No. 2、P. 130 ～ 135 (1989) [平成 1 年]
 - 30) 松沢弘幸：“最新のビッカース硬さ試験”、金属、84/5 臨時増刊号、P. 14 ～ 17 (1984) [昭和 59 年]
 - 31) 石川泰夫：“全自動ビッカース硬さ試験システム”、材料試験技術、Vol. 30、No. 4、P. 315 ～ 318 (1985) [昭和 60 年]
 - 32) 加藤朝章、富士谷 昌、高橋 薫、小林直樹：“画像処理によるビッカース硬さ測定の自動化”、材料試験技術、Vol. 32、No. 1、P. 11 ～ 17 (1987) [昭和 62 年]
 - 33) 加藤 章：“ビッカース硬さ測定への画像処理応用”、材料試験技術、Vol. 38、No. 1、P. 7 ～ 12 (1993) [平成 5 年]
 - 34) 川添 勝、澤 健司：“微小硬さ試験システム MicroWizhard シリーズ”、材料試験技術、Vol. 51、No. 4、P. 270 ～ 273 (2006)
 - 35) 富永敏文：“高温硬さ”、金属、84/5 臨時増刊号、P. 31 ～ 36 (1984) [昭和 59 年]
 - 36) 富永敏文：“高温硬さ試験の課題”、材料試験技術、Vol. 34、No. 4、P. 250 ～ 255 (1989) [平成 1 年]
 - 37) 大窪 茂：“日本における硬さ試験機ダイヤモンド圧子ハンマのルーツについて (3)”、材料試験技術、Vol. 30、No. 1、P. 72 ～ 77 (1985 年) [昭和 60 年]
 - 38) 山根可雄、木下拓治：“高温微小硬度計”、カタサ研究会資料、No. 38-290、P. 1 ～ 12 (1963) [昭和 38 年]
 - 39) 日本光学工業(株)：技術資料「高温顕微硬度計 QM」、P. 1 ～ 8 (1980) [昭和 55 年]
 - 40) 澤 健司、川添 勝：“規格に捕われない硬さ試験の応用 (高温試料に対する計装化押込み試験)”、材料試験技術、Vol. 53、No. 2、P. 93 ～ 97 (2008) [平成 20 年]
 - 41) (有) 今井精機：技術資料「携帯用ブリネル硬度計」、P. 1 ～ 2 (2006) [平成 18 年]
 - 42) (有) 今井精機：技術資料「ハードスコープ PS-1、PS-2 型」、P. 1 ～ 2 (2006) [平成 18 年]
 - 43) (株) 仲井精機製作所：技術資料「ポータブル ショア硬度計」、P. 1 (2006) [平成 18 年]
 - 44) 上野亮一：“エコーチップによる硬さ測定”、材料試験技術、Vol. 23、No. 2、P. 18 ～ 23 (1978) [昭和 53 年]
 - 45) 富士物産(株)：技術資料「スイス プロセク (PROCEQ) 社 製 EQUOTIP Hardness Tester」、P. 1 ～ 4 (2006) [平成 18 年]
 - 46) (株) ミットヨ：技術資料「反発式ポータブル硬度計 HARDMATIC HH-411」、P. 29 ～ 30 (2005) [平成 17 年]
 - 47) (有) 今井精機：技術資料「携帯用ロックウェル硬度計 PR-1 型」、P. 1 ～ 3 (2006) [平成 18 年]
 - 48) JFE アドバンテック(株)：技術資料「ハンディ硬さ計 SONOHARD SH-21」、P. 1 ～ 19 (2006) [平成 18 年]
 - 49) (株) ミットヨ：技術資料「ポータブル硬度計 HARDMATIC HH-120、140」、P. 26 ～ 28 (2005) [平成 17 年]
 - 50) (株) 明石製作所：技術資料「明石超微小硬度計 SMH100」、P. 1 ～ 2 (1985) [昭和 60 年]
 - 51) 福元巳年、山谷正毅：“超軽荷重微小硬度計”、材料試験技術、Vol. 37、No. 3、P. 236 ～ 238 (1992) [平成 4 年]
 - 52) R. S. Polvani, A. William Ruff, Jr, E. P. Whitenon：“A Dynamic Microindentation Apparatus for Materials Characterization”, Journal of Testing and Evaluation, Vol. 16, No. 1, P. 12 ～ 16 (1988)

- 53) 前田 豊一：“ダイナミック超微小硬度計 DUH-211”、材料試験技術、Vol. 52、No. 2、P. 106 ~ 108 (2007) [平成 19 年]
- 54) E. S. Berkovich：“Three-Faceted Diamond Pyramid for Micro-Hardness Testing”、Industrial Diamond Review、Vol. 11、No. 127、June、P. 129 ~ 133 (1951)
- 55) 佐田登志夫：島津科学器械ニュース（材料試験特集）、Vol. 27、No. 5、P. 1 ~ 2 (1986) [昭和 61 年]
- 56) 山本靖則：“日本材料試験技術協会創立 50 周年を祝して”、材料試験技術、Vol. 51、No. 4、P. 239 ~ 241 (2006) [平成 18 年]
- 57) 山本靖則、“ダイナミック超微小硬度計 DUH-200 について”、材料試験技術、Vol. 34、No. 4、P. 313 ~ 315 (1989) [平成 1 年]
- 58) 前田 豊一、湖中泰徳、川崎健史、山本靖則：“圧子押込み形表面物性評価装置について（ダイナミック超微小硬度計 DUH-211）”、日本試験機工業会、TEST、Vol. 1、P. 14 ~ 15 (2006) [平成 18 年]
- 59) 塚本雄二、鶴見正明、木村正人：“薄膜硬度計”、材料試験技術、Vol. 38、No. 2、P. 136 ~ 140 (1993) [平成 5 年]
- 60) 清野 豊、中野英俊：“光ファイバ干渉計を備えた小型ナノインデンテーション装置の試作”、材料試験技術、Vol. 44、No. 4、P. 229 ~ 233 (1999) [平成 11 年]
- 61) 熊谷 泰：“AFM 複合型ナノハードネステスターによる硬質薄膜の評価”、材料試験技術、Vol. 45、No. 1、P. 320 ~ 324 (2000) [平成 12 年]
- 62) 松岡三郎：“AFM 超微小硬さ試験機（ナノレベルの力学特性評価を可能にする）”、材料試験技術、Vol. 46、No. 1、P. 26 ~ 36 (2001) [平成 13 年]
- 63) (株) アカシ：“微小表面材料特性評価システム MZT-4”、材料試験技術、Vol. 45、No. 1、製品紹介欄、(2001) [平成 12 年]
- 64) (株) ミットヨ：技術資料「硬さ試験機総合“微小表面材料特性評価システム MZT-500 シリーズ”」、P. 21 ~ 23 (2006) [平成 18 年]
- 65) 島 義和：“超微小押込み硬さ試験機（超軽荷重型）：ENT-2100”、材料試験技術、Vol. 48、No. 1、P. 61 ~ 63 (2003) [平成 15 年]
- 66) 伊藤拓嗣、小俣有紀子：“エリオニクス社製電子線三次元粗さ解析装置と超微小押込み硬さ試験機の紹介”、材料試験技術、Vol. 53、No. 3、P. 232 ~ 234 (2008) [平成 20 年]
- 67) (株) エリオニクス：技術資料「超微小押込み硬さ試験機 ENT-1100a」、P. 1 ~ 7 (2008) [平成 20 年]
- 68) 計量研究所：創立 100 周年記念技術資料、P. 36 ~ 37 (2003) [平成 15 年]
- 69) 飯塚幸三：“反発かたさ試験におけるはね上がり
の電氣的測定”、計測と制御、Vol. 1、No. 3、P. 190 ~ 197 (1962) [昭和 37 年]
- 70) 飯塚幸三：“D 形シヨアかたさ試験機のボールクラッチの動作”、日本機械学会論文集（第 1 部）、Vol. 28、No. 191、P. 831 ~ 838 (1962) [昭和 37 年]
- 71) 飯塚幸三：“シヨアかたさ目盛の精度向上に関する研究”、計量研究所報告、Vo. 20、No. 4、P. 207 ~ 215、243 ~ 252 (1971) [昭和 46 年]
- 72) 飯塚幸三、後藤充夫、今井秀孝：“透過型顕微干涉法による微小球面の形状測定”、精密機械、Vol. 35、No. 5、P. 307 ~ 313 (1969) [昭和 44 年]
- 73) 飯塚幸三、今井秀孝、後藤充夫：“シヨアハンマの反発特性と標準ハンマの選定方法”、日本機械学会論文集（第 1 部）、Vol. 39、No. 317、P. 107 ~ 114 (1973) [昭和 48 年]

6 | 硬さ試験機の高性能化を支える周辺技術

6.1 ダイヤモンド圧子・ハンマーの高精度加工

6.1.1 我国での圧子・ハンマーの開発と変遷^{*1)}

図 6.1 には、大正時代から最近までの我国におけるダイヤモンド圧子・ハンマーの開発と変遷の概略を、時系列で示した。以下ではその経緯を、第 2 次大戦の前後に分けて整理した。

(1) 大正時代から第 2 次大戦敗戦まで

1917 年（大正 6 年）、小林豊造は日本で最初のダイヤモンド専門工場として、日本ダイヤモンド（株）を創業した。ダイヤモンド圧子・ハンマーを我国の関係者が直接手にして調査したのは、測定者が輸入試験機（アメリカ Wilson 社製ロックウェル硬さ試験機やイギリス Vickers-Armstrong 社製ビッカース硬さ試験機）を使用しているうちに、試験機付属の圧子・ハンマーで摩耗や欠損が生じて指示値の差異が明らかになり、その修正研磨を日本ダイヤモンドに相談した時点と考えられる。入社 1 期生の浜田義光はここで 1927 年（昭和 2 年）頃から硬度計に関与した。

1929 年（昭和 4 年）京都帝大 松村鶴造教授が松村式硬度計を考案、1930 年（昭和 5 年）に明石製作所でオルゼン型振子式ブリネル硬度計を母体として試作品を完成、翌 1931 年（昭和 6 年）から製造、1933 年（昭和 8 年）開催のシカゴ博覧会に出品された。この硬度計では直径 4mm のダイヤモンド球を圧子として使用するが、使用時に結晶方向を判別して圧子球を取付けることは期待できず、荷重を加えると使用中にダイヤモンドが割れる等で浜田は大変な苦勞をし、その末に、平たい原石を金属中に埋込み露出部分の先端のみを球面状に研磨した圧子とすることにより、力を金属部分で支えて割れないようにした。しかし、このブリネル硬さを改良発展させたユニークな発明もダイヤモンド球圧子製造の困難さが災いし、学校、軍関係に納入されたものの広く一般に普及するには至らなかった。

浜田は 1932 年（昭和 7 年）に独立し、（株）東京ダイヤモンド工具製作所を創業、ショア C 型、D 型のダイヤモンドハンマーとロックウェルのダイヤモンド圧子を開発製造することとなった。最初に作った C 型ハンマーでは技術・設備ともに大した問題もなく一応のものはできたが、D 型ハンマーでは当初、試験機本体側の問題（ボールチャックやボールゲージ内面の加工精度）もあり、表示値のばらつきが大きくその解

決に苦勞、試験機の改良を繰り返して徐々に精度を向上させていった。各試験機メーカーはその後もしばらくは機械をダイヤモンド会社に持込み 1 台ごとにダイヤモンドハンマーを合わせてもらっていた（1 台 1 日がかかりも珍しくなかった）。しかし、その後、試験機メーカーでハンマー先端の修正研磨法、いわゆる“ランダムポリッシュ法”、を考案、試験機メーカー側で表示値の調整に対処できるようになった。なお、D 型試験機は小型で機構的に単純な機械ではあるが、その調整が困難なため少人数の限られたメーカーで手作りに製造されており、戦後の 1980 年（昭和 55 年）頃にはその精度はオリジナルメーカーのものを凌ぐに至った。

ショア C 型、D 型とほぼ同じ頃、明石製作所で Wilson 社 M 型をモデルにロックウェル硬さ試験機を試作した。その当時まで舶来圧子の表面は荒仕上げで、東京ダイヤモンドでの修正研磨も荒仕上げであったが、明石製作所が光沢研磨仕上げされた新タイプの Wilson 社製圧子を持参、同仕様の圧子製造を依頼した。浜田は新たに専用研磨機を考案、1933 年（昭和 8 年）日本で初めて、現在使用されているような光沢研磨仕上げロックウェル・ダイヤモンド圧子の製造技術開発に成功した。当時、硬さ試験機の納品はダイヤモンド待ちの状態にあった。

その後、明石製作所はアームストロング型に改良を加え、独自設計のビッカース硬さ試験機を開発、ダイヤモンド圧子の製作を東京ダイヤモンドに依頼した。ビッカース圧子は平面研磨のため、ロックウェル圧子よりも課題は少なく、1935 年（昭和 10 年）浜田は我国初のビッカース・ダイヤモンド圧子を完成させた。東京都立工業奨励館への持込み検査で 6 本中 5 本が合格、その優秀さが立証された（同時持込みの輸入圧子は 6 本中 3 本合格に過ぎなかった）。また、1933 年（昭和 8 年）にはダイヤモンド研磨（株）[後の大阪ダイヤモンド工業（株）] が、1936 年（昭和 11 年）には旭ダイヤモンド工業（株）が相次いで創業した。

東京都立工業奨励館が取り扱った圧子依頼検査の成績報告書によれば、1939 年（昭和 14 年）4 月～1942 年（昭和 17 年）9 月までの合格率は、ビッカース圧子の対面角で 84.1%（2045 個中）、ロックウェル圧子の円錐角で 70.7%（1124 個中）、ロックウェル圧子の先端丸みで 80.5%（1156 個中）であった。

(2) 第2次大戦後

1949年(昭和24年)頃、(有)今井精機が携帯用ショア硬度計ハードスコープを試作、東京ダイヤモンドに依頼して小カラットの石を埋込んだ専用のダイヤモンドハンマーと歯車歯底測定用ダイヤモンドハンマーを新たに創作、国鉄で電気機関車用歯車や車輪の硬さ測定機として採用され、日立、東芝、三菱等の機関車工場でも使用されるようになった。また、1953年(昭和28年)頃、1台ごとに直径が異なりガラス管取付け後でないとハンマーを作れなかったショアC型ダイヤモンドハンマーについても、共摺り仕上げではあったが、注射器用ガラス管に着目し、安中特殊硝子製作所でショアC型用とハードスコープ用ガラス管として硬質特殊ガラスを使い、焼なまし熱処理と光沢内面研磨仕上げを施して内径寸法一定のガラス管開発に成功し、従来1個合わせであったC型ハンマーの寸法統一を実現、作り置きで納期短縮を可能にした。また、東京ダイヤモンドでは1958年(昭和33年)にアカシポータブル硬度計PHT用のダイヤモンド圧子(円錐角 100°)を、1959年(昭和34年)には日本で初めてヌーブ圧子を完成させている。

高温硬さ分野では、戦後間もなく明石製作所が押込み式高温微小硬度計の圧子製作を東京ダイヤモンドに依頼、1952年(昭和27年)に我国初の高温硬度計用圧子を完成させている。1956年(昭和31年)には島津製作所はアームストロング型ビッカース硬さ試験機に加熱炉を装備した高温硬さ試験機を開発、東京ダイヤモンドが上述の微小硬度計の経験を活かして圧子を製作納入した。その際、大気中高温加熱で露出部のダイヤモンド表面が分解・蒸発し圧子が痩せる問題に直面している。1963年(昭和38年)頃には日本光学工業(株)が、圧子として従来のダイヤモンド圧子の他に、より高温域用にサファイヤ圧子を備え、真空中または不活性ガス雰囲気中で試験を行うNikon高温微小硬度計を開発した。

(有)今井精機は1962年(昭和37年)頃、八幡製鉄所戸畑工場からブリキ板の硬さ試験方法原案準備に関連し、ダイヤモンドスポットアンビルの試作を服部時計店経由で依頼され、東京ダイヤモンドと共同開発、日本で初めてのダイヤモンドスポットアンビル群を完成納入した。なお、1960年代にはダイヤモンド圧子メーカーとして、富士ダイヤモンド工業(株)、不二ダイヤモンド工業所、北川ダイヤモンド工業(株)、東亜ダイヤモンド工具製作所、東洋ダイヤモンド工具製作所等の名もみられるようになり、1985年(昭和60年)頃には東京ダイヤモンド他で、超微小硬さ試

験機用に三角錐圧子も製作されるようになった。

6.1.2 ダイヤモンド圧子・ハンマーの形状と製造技術

(1) 圧子・ハンマーの形状と加工精度¹⁾

① ショアハンマー

C型及びD型ショア硬さ試験機のハンマーを図6.2に示す。両ハンマーともその先端にはほぼ球面にランダムポリッシュされたダイヤモンドが埋込まれている。標準ハンマーのダイヤモンド先端部は $1 \pm 0.07R$ の曲率半径で鏡面研磨され、その真円度は顕微コリメーターで測定、さらに干渉縞の位置測定からRの偏りを補正している。なお、反発高さにはダイヤモンドの形状、ハンマー本体との接着方法、表面粗さ、重量等様々な要因が関係するので、ハンマー製作メーカーや試験機メーカーはそれぞれ独自開発したハンマー先端ランダムポリッシュ技術で、ショア硬さ試験機の見盛調整を行っている。なお、ショア・ダイヤモンドハンマーの先端形状については、特にJIS規定はない。

② ロックウェル圧子

図6.3に示すように、ロックウェルの円錐ダイヤモンド圧子は6種類のスケール(C, D, A, 15N, 30N, 45N)に用いられる。JISにはロックウェル、ビッカースともダイヤモンド圧子自体の規格はないが、試験機及び基準片の検証に用いる圧子としての規格はある。

《JIS B 7726 試験機の検証》

- ・円錐角度(頂角): $120 \pm 0.35^{\circ}$ ・円錐母線真直度: 0.4mm当り0.001mm以下 ・球面部曲率半径: $0.200 \pm 0.015R$ 、4断面の平均 $0.200 \pm 0.010R$
- ・硬度計のばらつき許容差: $\pm 0.8HRC$

《JIS B 7730 基準片の校正》

- ・円錐角度(頂角): $120 \pm 0.17^{\circ}$ ・8断面の平均 120 ± 0.10 ・円錐母線真直度: 0.4mm当り0.0005mm以下 ・球面部曲率半径: $0.200 \pm 0.007R$ 、4断面の平均 $0.200 \pm 0.005R$ ・硬度計のばらつき許容差: $\pm 0.4HRC$

図6.4には、良好な真円度に研磨された圧子の先端形状顕微鏡写真と試験荷重をかけたときの干渉縞写真を示す。なおJISでは、ロックウェル・ダイヤモンド圧子のみ硬さまで言及している。これは、ダイヤモンド結晶特有の大きな研磨抵抗、硬度差が阻害要因となり完全な円錐や球形の圧子作製が困難なため、ダイヤモンド再研磨による押込み深さの調整や硬さ校正值も必要となる。

③ ビッカース、ヌーブ圧子

ビッカース硬さでは、図6.5に示すようなダイヤモ

ンド正四角錐圧子を用いる。

《JIS B 7725 試験機の検証》

- ・対面角: $136 \pm 0.5^\circ$ ・四角錐の中心軸: ホルダー座面に対して $90 \pm 0.5^\circ$ ・4面の先端は1点に合致(稜線長さの許容値は 図 6.5 参照)

《JIS B 7735 基準片の校正》

- ・対面角: $136 \pm 0.1^\circ$ ・角錐面の平面度: $0.3 \mu\text{m}$ 以下 ・先端稜線長さの許容値: 試験力 1.961N 未満で $0.25 \mu\text{m}$ 以下、1.961N 以上で $1.0 \mu\text{m}$ 以下
- 一方、ヌープ・ダイヤモンド圧子は斜方形ピラミッド(対面角 130° と $170^\circ 30'$)の先端形状をもち、圧痕の長さはビッカースに比べ 7.11 対 1、深さは約 1/2 で、ヌープ硬さの方が試料表面状態をより鋭敏に表す。圧子軸の形状、試験荷重ともビッカースと同じであるが、ビッカースは HV、ヌープは HK で硬さ表示する。

④ 超微小硬度計圧子

超微小硬さ試験には、対稜角 115° の三角錐圧子(バーコビッチ圧子²⁾)や 160° , 148° , 120° , 100° , 90° の各三角錐圧子、微小ビッカース圧子等が用いられている。三角錐圧子が多く用いられるのは、通常のビッカース圧子では4面の先端をナノメートルレベルで1点に合わせることが極めて困難で、JIS 許容の稜線長さ ($0.5 \mu\text{m}$ 以下)といえども超微小領域では硬さ値に与える影響が無視できないことによる。図 6.6 には、ビッカース、ヌープ、バーコビッチの各圧子を用いた硬さ試験で試料表面に生じた圧痕形状の一例を示す^{3, 4)}。

(2) 製造技術¹⁾

① ロックウェル圧子

- ・ダイヤモンドの固定(セッティング)

ダイヤモンドは基本的には正 12 面体の結晶形で、X, Y, Z の結晶軸 (100) の 4 面の先端をシャンクの軸心に合わせ焼結合金粉末中に鉛直にセット、高周波炉または電気炉中で焼成・固定する。なお、以前はダイヤモンドを整形し、軸に埋込み周囲をかしめて固定する方法と銀口ウ付け後かしめる方法が採用されていたが、焼結合金による固定や銀口ウ、チタンを主原料に真空炉や不活性ガス中で溶着する技術が発達し、従来問題視されていたダイヤモンドの緩み、脱落は近年ではほとんど無くなった。

- ・研磨

旋盤でダイヤモンド固定軸を加工し、その後、円錐に荒加工・予備研磨、仕上げ研磨を行う。仕上げ研磨には微粒子ダイヤモンド粉末を入れたレジンボンドやビトリファイドボンドのホイール(ダイヤモンドホイール)を用いる。

- ・角度測定

真円度を観察した後、先端 R の研磨を行う。

② ビッカース圧子

- ・ダイヤモンドの固定(セッティング): ロックウェル圧子と同じ

- ・研磨

ダイヤモンド固定軸を旋盤加工後、ダイヤモンドホイールで予備研磨、仕上げ研磨はダイヤモンド粉末を塗布したスカイフ盤で面精度を確認しながら 1 面ずつ欠け・傷を取り除き、4 面の頂点を 1 点に合わせていくが、4 面を完全に 1 点に合わせることは極めて困難で、理論的にゼロは有り得ない。なお、超微小硬さの測定で多用されている三角錐圧子は、理論的には 1 点に合わせることができるとは、実際には 2 面が合わさる稜線に微妙なダレが生じることがあり、また、稜線の集合する三角錐の頂点はナノレベルで丸みを生じる。

- ・精度測定

顕微コリメーターや形状測定機による面角測定は可能であるが、通常は工具顕微鏡で対稜角を測定し、対面角の精度を判定している(対面角 136° は対稜角 $148^\circ 07'$ に相当)。先端稜線の判定は、HV700 程度の試料に圧痕をつけ、試験機付属の顕微鏡やディスプレイ上で行う。また、表面や稜線の観察では工具顕微鏡も併用している。

6.2 硬さ試験用荷重検定器⁵⁾

硬さ試験機の荷重検定に関しては、引張試験機等で使用される一般の荷重検定器に比べ比較的低荷重で、かつ、測定位置如何で測定値にも影響するので、独特の工夫をした荷重検定器が(株)前川試験機製作所他で製作されている。

(a) 予備たわみ機構付荷重検定器

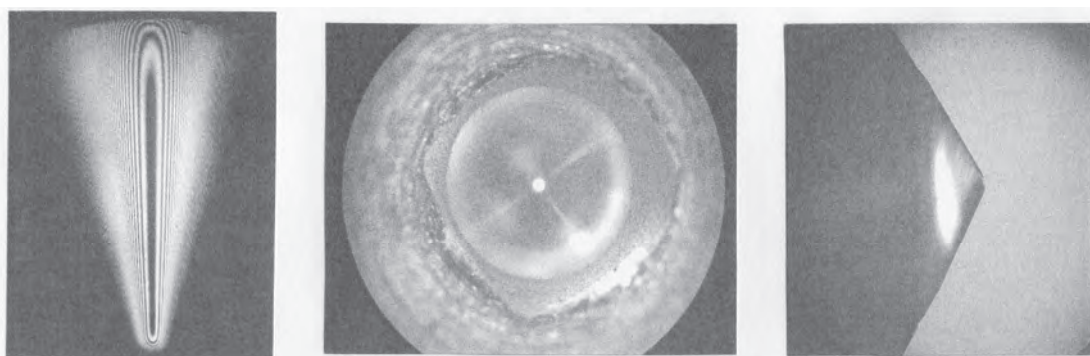
予備たわみを事前に与えておき、この状態から試験荷重を加え、変形量が硬さ試験時の圧子変位またはくぼみ深さ程度になるようにして使用する(図 6.7 参照)。

(b) 比較測定式荷重検定器

本器は 500gf ~ 10kgf 程度の硬さ試験機荷重検定用で、被測定荷重は、比較用おもりに負荷時と実荷重負荷時の検定器たわみの差、及び検定器たわみのばね定数から求められる(図 6.8 参照)。なお、微小硬さ試験用の荷重検定器では、測定範囲 0.5 ~ 25gf、精度 5mgf 以下のものが製作されている。

[参考文献]

- * 1) 大窪 茂: “日本における硬さ試験機ダイアモン

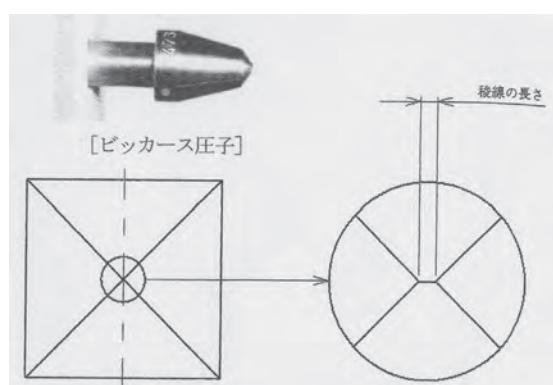


(a) 干渉縞写真

(b) 先端球面部

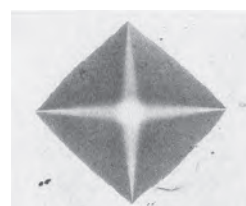
(c) 先端外形

図6.4 ロックウェル・ダイヤモンド圧子の加工状況¹⁾

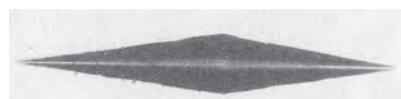


試験力(F)の範囲 [N (kgf)]	許容値 [μm]
$F \geq 49.03(5)$	2 以下
$1.961(0.2) \leq F < 49.03(5)$	1 以下
$0.09807(0.01) \leq F < 1.961(0.2)$	0.5 以下

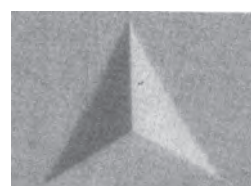
図6.5 ビッカース・ダイヤモンド圧子先端の稜線長さ¹⁾



(a) ビッカース圧子 [顕微鏡観察]



(b) スnoop圧子 [顕微鏡観察]



(c) 三角錐圧子 [電顕観察]

図6.6 硬さ試験による圧痕形状例^{3,4)}

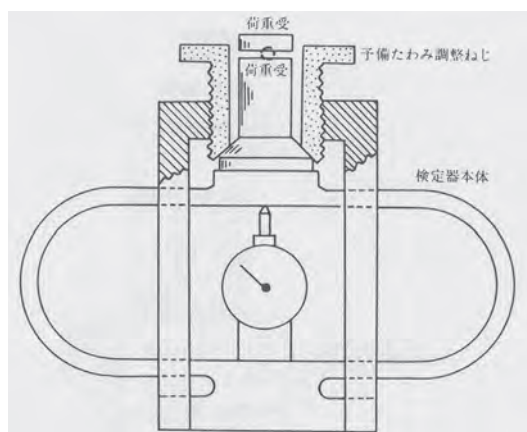


図6.7 予備たわみ機構付荷重検定器⁵⁾

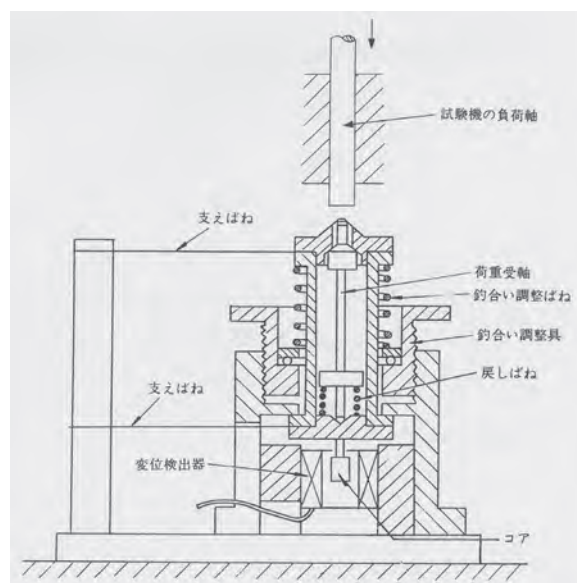


図6.8 比較測定式荷重検定器⁵⁾

7 | 硬さ基準片の開発、技術の変遷

7.1 基準片の役割、硬さの基準

(1) 基準片の役割

“硬さ基準片”は硬さ値の明らかな試験片(工具)で、硬さ試験機の“間接精度検証”に用いられる。基準片による検査で異常が発見された場合には、その原因となる負荷機構(力)、測長機構(長さ)等の“直接精度”を検証し、これらを校正するのが硬さ試験機管理の原則である。表 7.1 には、基準片による間接検証の許容差を示す^{1,2)}。なお、このような任務を負う基準片が具備すべき特徴として、① Uniform: どこを測っても硬さが均一、② Universal: そこに示されている値が普遍的かつ正確、③ Stable: 硬さの安定性が高い(顕微鏡組織的に、形状・寸法的に)ことが要求される。

(2) 硬さの基準

硬さは物理量とは異なり、定義に基づき試験を行って初めて得られる“工業量”であり、HB、HS、HR、HV 等の、硬さ単位でない“硬さ記号”で表示される。硬さの基準は、主に ① 荷重(試料に与える力)、② 長さ(それにより生じる材料の変形量)、③ 時間(負荷速度と荷重保持時間)の3要素で構成されるため、硬さ基準にとって試験方法の定義(試験方法規格)は極めて重要である。図 7.1、図 7.2 には、それぞれ負荷速度や荷重保持時間の影響例を示す²⁾。

基準片メーカーは“直接精度”の高い正確な試験機を用い、共通の定義による力(荷重)のかけ方を採用して基準片の硬さ測定を行い、その結果を基準値として基準片に表示している。実務上用いられている硬さの換算表(式)は、材料毎に経験的、実験的に得られたおおよその関係を表(式)により目安としたものである。

7.2 開発の経緯^{*1~4)}

各硬さ試験機の総合誤差(機差)を検定するには、硬さ基準片が必要となる。その表示基準値が媒体となり、工業的な検査分野で材料や物品の硬さ測定値に工業量として普遍性を与えている。最も古い硬さ基準片はアメリカ ショア社製の角形基準片で、硬さ試験機の付属品であった(アメリカ ウィルソン社製のロックウェル硬さ試験機にも硬さ基準片が付属)。我国でも戦前、この2社の製品をまねて鋼製硬さ基準片が熱

処理関係者の部分的仕事として少量製造され、硬さ試験機の付属品として使用されてきた。東北大学金属材料研究所所長本多光太郎に師事して鉄鋼材料の熱処理で研鑽を積み、複数の企業で生産活動に従事した後、1939 年(昭和 14 年)に日本物理冶金を創立した山本正一は我国で初めて鋼製硬さ基準片の研究開発に着手、1952 年(昭和 27 年)には(株)山本科学工具研究社を創設し、硬さ基準片の製造販売を開始している。

戦後、材料や物品の製造工程で製品の品質管理や保証を行う際に、硬さ測定の有効性が認識されるようになったが、各試験機で測定される硬さ値の相違が大問題となり、その相違縮小に硬さ基準片を媒体とする試験機管理手法が導入された。そのため、第3章で詳述したように、金属材料や材料工学の専門家、試験機や硬さ基準片の製造業者等による委員会、研究会の研究調査活動が盛んに行われ、その結果として、信頼できる硬さ基準片とその基準値が不特定多数の材料や工業製品の製造関係者に恒常的に提供できるようになった。これは産学官が一体となりその目的に協力した賜物である。現在 我国では、基準片は専門メーカーにより供給され、海外の標準研究機関にも採用される等、国内外で品質的にも高い信頼を得ている^{1,2)}。

7.3 硬さ基準片の製造、使用

7.3.1 基準片利用の現状

硬さ基準片の国内生産でその大半を占める基準片専門メーカーの(株)山本科学工具研究社では、1999 ~ 2003 年(平成 11 ~ 15 年)時点で、表 7.2 に示すような約 140 種類の基準片を年間総数で約 3 万個製造、その構成比を図 7.3 に示す。特にロックウェル硬さの比率が約 70% (HRC は 47%) と高く、残りはショア、ブリネル、ビッカース、微小硬さがそれぞれ約 7% ずつとなっている。硬さ管理の難しいショア硬さが我国で現在に至るまで有効利用されているのは、JIS に規定された“ビッカース硬さからショア硬さへの換算方式による基準管理”の成功によるところが大きく、海外でも高く評価されている。なお、欧米でもそれぞれ日本と同程度の基準片が利用され、年間 10 万個程度が世界全体の実需要数と推測される²⁾。

基準片の素材は鉄鋼材料が中心で、これに次ぎ銅合金も多く使用され、特殊なものとして純金(約 30HV) やセラミックス(窒化けい素: 約 1650HV)

も使用されている。試験荷重範囲はマイクロビッカースの 10gf (98.07mN) からブリネル硬さの 3000kgf (29.42kN) までと極めて広く、近年は 1gf (9.807mN) 以下の超微小硬さ用基準片の開発も進められている。

7.3.2 製造方法^{1,2)}

基準片メーカーは理想的な硬さ均一性と安定性を実現するために、素材選択と材料採取、熱処理を行い、基準規格に定められた高精度の試験機群で普遍的かつ正確な試験条件管理の下に、基準値の決定を行う必要がある。

(1) 素材と材料採り

実際の基準片には、熱処理により広範な硬さ値に対処できる鉄鋼材料（約 150 ～ 1000HV）を中心に、銅合金（40 ～ 400HV）、セラミックス（窒化けい素：1650HV）等が用いられている。素材には専用的高清浄度材料を使用、金属材料の中心偏析の影響を避けるために平板材料を用い、円盤形に加工して熱処理を施す。円盤形にすることで熱処理時のコーナーエフェクトを最小限とし、硬さ均一性の向上を図っている。

(2) 熱処理

鉄鋼製基準片には均一加熱・冷却による焼入れを施す。特に高硬度の基準片では、必要に応じサブゼロ処理を行い、残留オーステナイトを極小に抑える。また、銅合金には圧延や加工による残留応力を除去する目的で低温焼なましを行う。基準片の製造条件安定化を図るため、熱処理以降はロット単位（1ロット 20 個）で製造と工程管理を実施している。

(3) 表面仕上げ

表面仕上げは、熱処理欠陥層を完全に取り除くと同時に、表面層に新たな欠陥を生じないように留意して行う（効率や外観を優先して、研削焼けや表面硬化層を生じさせるようなことはしない）。

(4) 硬さ測定（基準値の決定）

基準片の硬さを決定する測定は、ISO 及び JIS の硬さ基準片規格に準拠して行われる。一般に試験室は 24 時間空調を行い 23 ± 5℃に管理し、試験機の直接精度の許容値は一般試験機のおよそ 1/2 に規定されている。負荷条件も重要で、より精密な管理が要求される。基準片の硬さ測定は通常 1 個につき 10 点であるが、前半 5 点と後半 5 点に分け、別々の試験機、測定者で行う。図 7.4 には、その一例として、HRC 硬さ基準片における測定位置を示す。なお、1 ロット 20 個の内、先頭番号の基準片は管理保証用基準片（非売品）とし、ロット全体の測定原データとともに 3 年間保管される。

ショア硬さ基準片は JIS 基準片規格により、ビッカース硬さから基準値を決定、さらにショア硬さによる確認試験を行っている。この基準片用の材質・形状も規定されており、他に例を見ない実務的かつ高精度のショア基準が確立されている。ビッカース及びマイクロビッカース硬さ基準片では、硬さの荷重依存性を確認するため、3 段階の荷重（ビッカース：30、10、1kgf、マイクロビッカース：1、0.1、0.01kgf）で測定される。

7.3.3 使用方法²⁾

(1) 基準片の選択

硬さ試験機 JIS 規格に使用する硬さレベルが示されている場合はそれに従う。一般には使用するスケールの高、中、低硬さレベル 3 段階の硬さ基準片を選択し、必要があれば実際の製品、部品に近い硬さの基準片を選択する。

他の硬さスケールの基準片を換算して用いることはよくない。試験方法によっては基準片の材質や厚さ、表面仕上げ方法が異なっており、硬さの換算は単なる目安にすぎない。ビッカースやマイクロビッカース硬さでは、複数の試験荷重で基準片を測定しないと試料の荷重差の確認を行えないので注意を要する。

(2) 基準片の確認

硬さ試験の障害となる傷、汚れがないことを基準片の表裏面で確認した後、表面の基準値、側面のシリアル No. 等を確認する。基準片には基準片メーカーの全測定値、測定年月日等が明記された検査票が必ず添付されている。メーカーの保証期間（検査印日付より 3 年間）にも留意する必要がある。

(3) 基準片による試験機の検査〔間接検証〕

通常、基準片は試料の試験前に測定する。試験時間中の変動を考慮する場合には、試料の試験前後と中間で基準片の測定を行うことが望ましい。ビッカース硬さでは試験荷重が変わると試料の硬さ値が違う場合があるので、試料と同じ荷重で基準片を測定しておくことが極めて有効である。

本測定は各試験方法とも JIS では 5 点と規定されているが、図 7.5 に示すように基準片を分割し、1ヶ所で集中的に押圧することは避ける。測定結果についてはその平均値とばらつき（ $R = \text{Max.} - \text{Min.}$ ）を求め、当該規格に照らしてそれぞれが規格の許容差内にあることを確認する。なお、許容差を超える場合には、専門家による直接検証（力、長さ等）を受ける（補正はあくまで参考程度に留める）。

(4) 基準片の安定性（測定点数）

基準片の硬さは金属組織的には安定しているが、厳密には押圧点数が増加すると硬さ値は上昇する。基準片を硬さの標準物質として取り扱わないのは主にこの理由による。この硬さ変化はくぼみの増加による加工硬化、残留応力の上昇、基準片の反り変形に起因するもので、HRC 硬さでの実験結果を図 7.6 に示す。一般には JIS で定めるように、くぼみ間隔は 4 d (d : くぼみの大きさ) 以上として使用する。HR 硬さ基準片での最大測定点数を表 7.3 に示すが、精密な管理を行う場合にはこの数値の半分以下を推奨している²⁾。

7.4 新たな硬さ基準片作りへの挑戦

(1) リーブ硬さ試験の基準片

超硬合金またはダイヤモンド圧子をスプリング等により試料に当て、衝突前後の圧子の速度比から硬さを求める携帯用の反発硬さ試験機では、スイスのリーブが考案した“エコーチップ”が世界的に普及しつつある。なお、一般的に試料の質量が反発硬さ値に大きく影響するが、この試験機では機枠や受台を用いないため、ショア硬さ基準片よりもさらに大形の基準片が必要となる。日本材料試験技術協会ロール硬さ委員会を中心とする研究結果から、この試験機用として、φ 115 × t 33、質量 2.7kg の平板共析炭素鋼製基準片が開発され、HV 硬さ値からそれぞれ HLD 硬さ（超合金圧子用）、HLE 硬さ（ダイヤモンド圧子用）への換算で、リーブ硬さ基準片の値を決定している [(1)、(2) 式 参照]^{2,3)}。

$$\text{HLD} = 5.80025\text{HV} - 0.03700\text{HV}^2 + 1.64338 \times 10^{-4}\text{HV}^3 - 4.47083 \times 10^{-7}\text{HV}^4 + 7.37816 \times 10^{-10}\text{HV}^5 - 7.19506 \times 10^{-13}\text{HV}^7 + 3.80559 \times 10^{-16}\text{HV}^7 - 8.40172 \times 10^{-20}\text{HV}^8 \quad (1)$$

$$\text{HLE} = 3.9031\text{HV} - 0.011433\text{HV}^2 + 1.95101 \times 10^{-5}\text{HV}^3 - 1.64377 \times 10^{-8}\text{HV}^4 + 5.3329 \times 10^{-12}\text{HV}^5 \quad (2)$$

(2) 超微小硬さ試験の基準片

超微小硬さ試験用の基準片材料として、従来 Si 単結晶やガラス等が用いられてきたが、これら材料は硬くて脆いので、くぼみは小さく、また荷重を大きくするとくぼみ周辺がくずれ、マイクロビッカース硬さとの関係が明確ではなかった。現在では、表面酸化に強くかつ軟らかい純金製微小硬さ基準片 30HVM が作られ、1gf で約 7 μm、0.1gf でも約 2 μm のくぼみが得られることから、深さ測定超微小硬さと圧痕形状測定マイクロビッカース硬さの比較が行い易くなった^{2,4)}。

2007 年（平成 19 年）に試験供給を開始したナノインデンテーション用タングステン単結晶基準片（図 7.7

参照）では、両硬さ試験結果が検査票に表示されている^{2,5)}。この基準片を用いれば、タングステン単結晶が圧子押込み過程で示すポップイン現象（弾性変形から塑性変形への瞬間的な遷移現象）から、ダイヤモンド圧子先端の損耗状態も把握できる⁶⁾。

[参考文献]

- * 1) 材料試験技術研究会、日本試験機工業会 共編：「日本における試験機のあゆみ」、P. 18 ~ 31 (1982) [昭和 57 年]
- * 2) (株) 山本科学工具研究社・文献集：「硬さ基準片について」、第 1 巻、P. 1 ~ 681 (1998) [平成 10 年] 《1939 ~ 1998 年（昭和 14 年 ~ 平成 9 年）の文献まとめ》
- * 3) 同、第 2 巻、P. 1 ~ 106 (2002) [平成 14 年] 《1998 ~ 2002 年（平成 10 ~ 14 年）の文献まとめ》
- * 4) 同、第 3 巻、P. 1 ~ 203 (2007) [平成 19 年] 《2003 ~ 2007 年（平成 15 ~ 19 年）の文献まとめ》

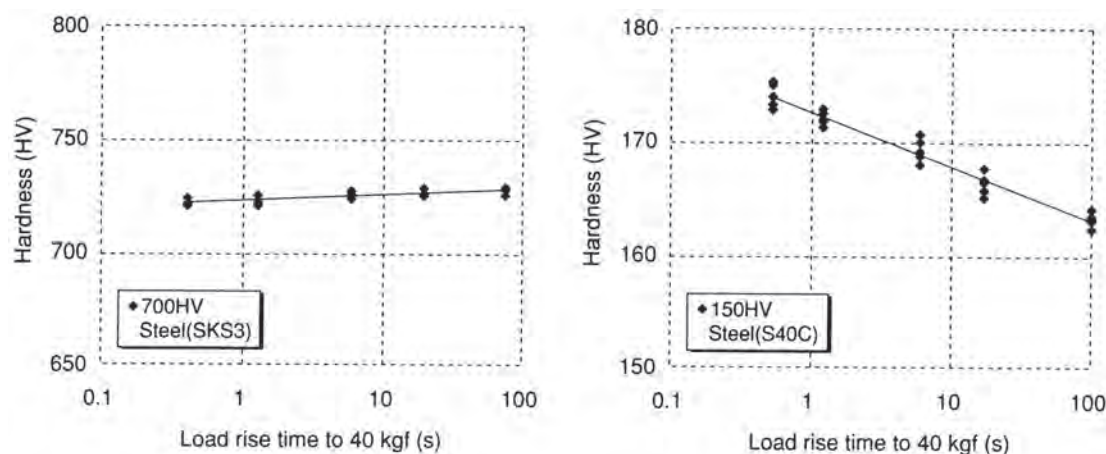
[注]

- 1) 山本 卓、川島博行：“高精度硬さ基準片の現状と展望”、材料試験技術、Vol. 48、No. 4、P. 264 ~ 267 (2003) [平成 15 年]
- 2) 山本 卓：“硬さ基準片の現状と動向”、日本材料試験技術協会「現場の硬さ試験」講習会テキスト、P. 5-1 ~ 5-20 (2007) [平成 19 年]
- 3) 関谷三郎、山本 晋、山本 卓：“リーブ硬さ基準片の試作”、材料試験技術、Vol. 35、No. 2、P. 147 ~ 150 (1990) [平成 2 年]
- 4) 山本 卓、川島博行、柴田幹枝、松本辰美：“純金製硬さ基準片と Berkovich 硬さ試験の評価”、材料試験技術、Vol. 47、No. 3、P. 194 ~ 197 (2002) [平成 14 年]
- 5) 山本 卓：“硬さの相似則と基準片”、金属、Vol. 76、No. 12、P. 1310 ~ 1315 (2006) [平成 18 年]、Vol. 77、No. 1、P. 74 ~ 78 (2007) [平成 19 年]
- 6) 硬さ研究部会報告：“第 42 回 硬さに関する懇話会”、材料試験技術、Vol. 52、No. 2、P. 109 ~ 112 (2007) [平成 19 年]

表7.1 硬さ試験機の総合誤差(間接検査)と硬さ基準片における均一性の許容差^{1,2)}

硬さ種別と規格	硬さ範囲	硬さ試験機規格			硬さ基準片規格		
		n [個数]	許容差 [均一性]	R	n [個数]	基準値の 信頼限界	R [均一性]
HB 硬さ試験機規格 (JIS B 7724)	225HB 未満	3	±3%*	(8.0%)	(3×2)	±2%	4%
HB 硬さ基準片規格 (JIS B 7736)	225HB 以上	3	±3%*	(4.0%)	(3×2)	±1.3%	2%
HS 硬さ試験機規格 (JIS B 7727)	75HS 以上	10	±1.5	2.0	10	(±0.5)	±0.6 1.5
HS 硬さ基準片規格 (JIS B 7731)	75HS 未満	10	±1.5	1.5	10	(±0.5)	±0.4 1.2
HR 硬さ試験機規格 (JIS B 7726)	75 ~88HRA	5	±1.5	規格参照	(5×2)	(±0.6)	0.4
	80~100HRB	5	±2	規格参照	(5×2)	(±0.8)	1.0
HR 硬さ基準片規格 (JIS B 7730)	20~70HRC	5	±1.5	規格参照	(5×2)	(±0.6)	0.4
	HR30N	5	±2	規格参照	(5×2)	(±1.0)	0.6
	HR30T	5	±3	規格参照	(5×2)	(±1.3)	1.2
HV 硬さ試験機規格 (JIS B 7725)	700HVMV 0.2kgf	5	±11%	8.0%	(3×2)	(±5.3%)	4%
	1kgf	5	±5%	8.0%	(3×2)	(±2.5%)	4%
HV 硬さ基準片規格 (JIS B 7735)	700HV						
	10kgf	5	±3%	4.0%	(5×2)	(±1.0%)	2%
	30kgf	5	±2%	4.0%	(5×2)	(±1.0%)	2%

[注] それぞれの数値は JIS 規格に準拠、() 内の数値は(株)山本科学工具研究社での試験値



(横軸は Load rise time : 荷重が 40kgf に到達するまでの時間)

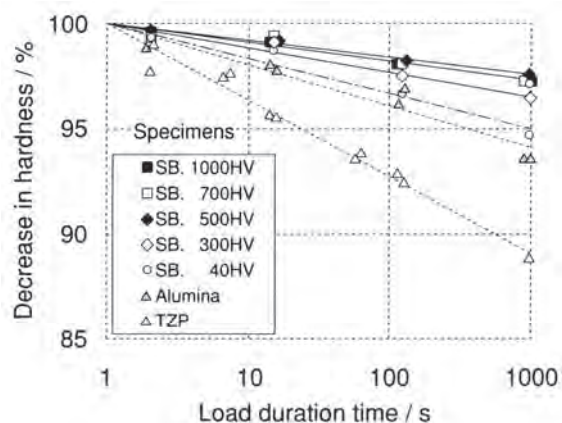
図7.1 ビッカース硬さにおける負荷速度の影響²⁾

表7.2 (株)山本科学工具研究社の硬さ基準片要目一覧表^{2,5)}

[2007年(平成19年)現在]

硬さ種別	標準呼び硬さ	呼び硬さ 範 囲	測定点数 (n)	バラツキ許容値 (R=Max-Min.)	材 質 (JIS記号)	形 状 (mm)	測定面の 仕 上 げ	準拠規格
HMV (1, 0.1)	1650	±10%	4 (2x2)	2% (HV1)	Si ₃ N ₄	□10X5	□	JIS B 7735
HMV (1, 0.1, 0.01)	900, 800, 700, 600, 500	±15	6 (3x2)	5% (HV0.1)	SK85	φ25X6	□	JIS B 7735
φ	400, 300, 200 (Be Copper)	±15	φ	φ	C1720P	φ25X6(2)	□	φ
φ	100 (C2600P), 40 (C1020P),	±10	φ	7 (100HV0.1), 4 (40HV0.1)	←	φ25X5※	□	φ
HMV (0.1, 0.01, 0.001)	30(Au)	±10	φ	4 (HV0.1)	Au	φ25X5(0.8)	□	φ
UMV (0.01, 0.002)	900, 700 (付・バー・コーティング・インデントーション・9.8mN)	±20%	6 (3x2)	10% (HV0.01)	SK85	φ25X6	■	JIS B 7735
φ (0.01, 0.001)	500, 200 (φ)	φ	φ	φ	SK85, C1720P	φ25X6(2)	■	φ
★ HN-W ナノインデントーション用超微小硬さ基準片 (HV0.01, 0.001 付・バー・コーティング・インデントーション・9.8mN)		約430 HV0.001	6 (3x2 HV, Nano)		タンガスステン単結晶 (W: φ9X3)	φ25X6	■	JIS B 7735 新製品
HV (30, 1)	1000 (SK120), 900, 800, 700	±15	10 (5x2) / HV30, 10	1.5%	SKS3	φ64X15	○	JIS B 7735
HV (10, 1)	600, 500, 400, 300, 200 (SK85), 150 (S45C)	φ	6 (3x2) / HV1	φ	←	φ	○	φ
φ	100 (C2600P), 40 (C1020P)	±10		(150HV以下2.2%)	←	φ64X10	○	φ
HS	100 (SK120), 95, 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30	±2	HV10 (5x2)	R VHS ≤ 1.5 (70HRS以下1.2)	SK85	φ64X15	○	JIS B 7731
φ	20 (S20C), 7 (C1020P φ64X10)	φ	HS10 (5x2)	△HS (HS-VHS) ≤ 0.5	←	φ	○	φ
HL	HLE (Dai) 850, 800, 700, 600, 500	±15	(HV測定)		SK85	φ115X33	○	JIS B 7731
	HLD (WC) 880, 830, 730, 630, 520	φ			φ	φ	○	関連
HR C	70 (SK120), 67, 64, 62, 60	±1	10 (5x2)	0.2	SKS3	φ64X15	○	JIS B 7730
φ	57, 55, 50, 45, 40, 35, 30, 25, 20, 10	φ	φ	(40RC以下0.3)	SK85	φ	○	φ
HR A	87, 85, 83, 81, 78, 75, 71, 65, 56	φ	φ	0.3	HRCに同じ	φ	○	φ
HR 30N	83, 81, 78, 73, 67, 60, 55, 50, 41	φ	φ	0.6	φ	φ	○	φ
HR 15N (45N)	92, 90, 87, 85, 80, 75 (43) (23)	φ	φ	φ	φ	φ	○	φ
HR B	100, 95, 90	±2	10 (5x2)	0.8	SK85	φ64X10	△	JIS B 7730
φ	82, 72, 62, 52, 42, 32	φ	φ	(50RB以下1.0)	C2600P	φ	△	φ
HR 30 T	78, 72, 62, 52, 42, 38, 32	φ	φ	1.0	HRBに同じ	φ	○	φ
HR 15 T	87, 82, 78	φ	φ	φ	φ	φ	○	φ
HR (E-M-L-R-F-S)	HRE90 HRM107 HRL118 HRR123 HRF90	φ	φ	φ	(100HV)	φ	○	JIS K 7202
φ	HRM67 HRL92 HRR105 HRS90	φ	φ	φ	(40HV)	φ	○	φ
HBW 10/3000	600, 550, 500, 450, 400, 350	±15	6 (3x2)	1.5%	SK85	φ115X18	●	JIS B 7736
HB 10/3000	300, 250, 229 (d=4mm), 200, 180	φ	φ	φ	φ	φ	●	φ
	HB (10/3000) 150, HB (10/500) 125	φ	φ	2.5%	S45C	φ	●	φ
	HB (10/500) 100	φ	φ	3%	S10C	φ	●	φ

注: 測定面の仕上げ ●精研 △定盤ラップ仕上げ ○バフ仕上げ □超仕上げ ■超仕上げ(精) NIST HRC基準片取扱 い ※ φ25X6に順次仕様変更



(SB. 40HV : 純銅製基準片, SB. 300~1000HV : 鋼製基準片)

図7.2 ピッカース硬さにおける荷重保持時間の影響²⁾

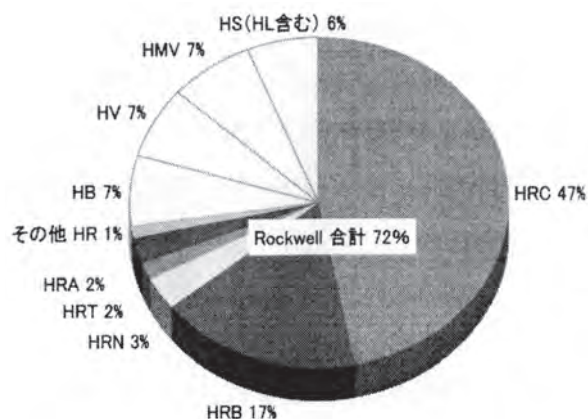


図7.3 硬さ基準片の市場構成比(1999~2003)²⁾



図7.4 硬さ基準片の測定位置²⁾

表7.3 HR硬さ基準片における最大測定点数(参考値)²⁾

硬 さ	60 HRC	30 HRC	90 HRB	60 HRB
耐用度	約 500	約 260	約 250	約 200

(注) カタサ研究会第14分科会の総合結果 1964年(昭和39年)

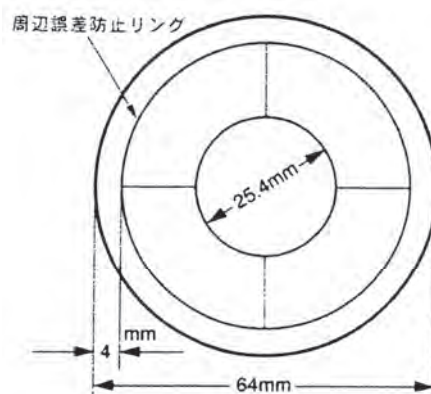


図7.5 測定面分割区画線の例(N=5)^{2,5)}

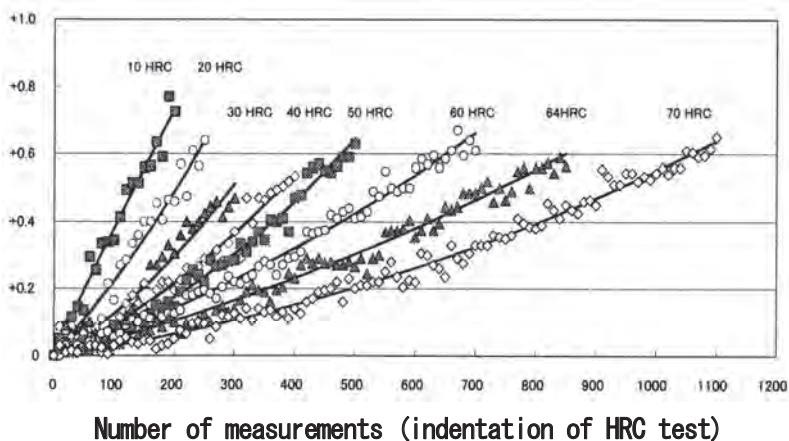


図7.6 測定点数の増加に伴う基準片の硬さ測定値の変化²⁾

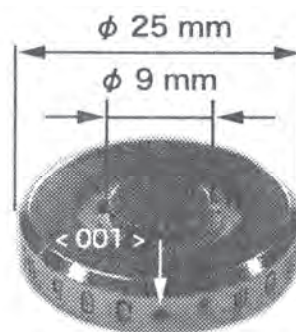


図7.7 超微小硬さ試験用タンゲステン単結晶基準片^{2,5)}

8 | ものづくり現場における硬さ試験の利用

8.1 硬さ試験の意義

硬さ試験は材料の強度と密接に関係する。硬さは材料の変形抵抗そのものであり、材料の三大特性である強さ、延性、靱性のうち 強さを、引張試験を実施することなく推定できるところに最大の利点がある。また、現場で硬さ試験を行う場合、硬さそのものの値を重視するのではなく、硬さを介して他の特性（強さ、焼入性、疲労特性等）を推定できるので価値がある。製造現場における硬さ試験では、材料規格の硬さ値を満足するかどうかを検査する場合が多い。

図 8.1 には、硬さ測定による材料特性の評価を示す。このうち、“1. 鉄鋼材料の硬さ試験測定”と“2. 鋼質試験”は日本工業規格（JIS）に準拠して行われるもので製造現場的な試験であり、“3. 引張強さの推定”以降の項目は JIS にはなく、研究的にまたは各製造会社がそれぞれ独自に所有する硬さ試験データベースや測定ノウハウ、経験・実績に基づき行うことが主体となる。以下に述べる硬さ試験の利用において、硬さ値そのものよりも硬さ値から広範囲の材料特性評価が可能なこと、硬さ試験が非破壊的な材料試験方法であることを勘案すれば、工業材料の特性をものづくり現場で直接判定する上で硬さほど重要で意義ある尺度はないといえる¹⁾。

8.2 硬さ試験利用の実状

第3章の図 3.1 に示したように、近年の我国における産業の高度化と産業構造の変遷（いわゆる“重厚長大”から“軽薄短小”へ）に伴い、ものづくり現場における硬さ試験の測定対象も従来の素材（線材、板材）、機械加工・熱処理部材、塑性加工部材、粉末焼結部材のような単一材料部材から、溶接・異材接合部材、表面硬化処理部材（浸炭、窒化、高周波焼入れ）、薄膜（メッキ、アルミ陽極酸化被膜、セラミックスコーティング）、エレクトロニクス微小部材（半導体・電子デバイス）等の材料複合部材にまで広がってきている。第5章ではこれらに対応すべく行われてきた硬さ試験機開発の変遷について述べたが、昭和以降この 80 数年の間に最大荷重 3000kgf のブリネル硬さ試験機から最小荷重 1mgf レベルの超微小硬さ試験機まで種々の硬さ試験機がものづくり現場に材料評価装置として導入された

ことになる。

（1）鉄鋼材料の硬さ試験規定

鉄鋼材料規格 [JIS ハンドブック（鉄鋼）] では、材料規格区分（機械構造用炭素鋼・合金鋼、特殊用途鋼、鑄鍛造品、電気用材料、棒鋼・形鋼・鋼鉄・鋼帯、鋼管、線材・線材二次製品）毎に、JIS 規格番号でそれぞれの材料名称と記号、適用する硬さ試験と硬さ値規定方法（範囲、以上、以下）を設定している¹⁾。

機械構造用炭素鋼・合金鋼では、図 8.2 に示すように、鋼の焼入れ性試験法（ジョミニー一端焼入れ法）により長さ方向の硬さ分布を測定し、焼入れ性を決定する。この図から合金鋼は炭素鋼に比べ焼きがよく入ることがわかる。なお、図中の矢印はジョミニー曲線の変曲点である²⁾。

（2）硬さによる鋼質試験

硬質試験では、以下の測定方法に関して適用する硬さ試験とその試験内容が JIS に規定されている¹⁾。

- ① 鋼の浸炭硬化層深さ測定方法：HV 硬さによる硬さ推移曲線の作成、有効硬化層深さ、全硬化層深さ
- ② 鋼の脱炭層深さ測定方法：HV・HRC 硬さによる硬さ推移曲線の作成、全脱炭層深さ、実用脱炭層深さ
- ③ 鋼の炎焼入及び高周波焼入硬化層深さ測定方法：HV・HRC・HR15N 硬さによる硬さ推移曲線、有効硬化層深さ、全硬化層深さ
- ④ 鋼の焼入れ性試験方法（一端焼入方法）：HRC・HV 硬さによる焼入れ性図表の作成
- ⑤ 鉄鋼の窒化層深さ測定方法：HV・HK 硬さによる硬さ推移曲線、実用窒化層深さ、窒化層深さ
- ⑥ 鉄鋼の窒化層表面硬さ測定方法：HV・HK・HR15N・HS 硬さ（窒化層深さで測定法使い分け）

（注）HV：ビッカース、HK：ヌープ、HRC：ロックウェル C スケール、HR15N：ロックウェルスーパーフィシャル 15N スケール、HS：ショア

（3）硬さによる引張強さの推定

図 8.3 と図 8.4 にはそれぞれ鉄鋼材料（炭素鋼・合金鋼）、アルミニウム合金展伸材における硬さと常温での引張強さの関係を示す。いずれも上限値付近の硬さ範囲を除けば、硬さと引張強さはほぼ比例関係にあり、鉄鋼材料ではビッカース硬さと引張強さ σ_B との間に σ_B (kgf /mm²) $\div$ 3.27 $\times$ HV (ビッカース硬さ) の関係が成り立っている^{1,2)}。また、JIS ハンドブック（鉄鋼）には硬さ換算表中に引張強さ（近似値）が

示されている。

〔参考〕熱処理と硬さ、引張強さ³⁾

鋼の機械強度特性は、熱処理により大幅に改善される。“焼なまし”を施せば鋼は軟らかくなり変形能は増すが、引張強さ σ_B は硬さに比例して低くなる。その際、硬さと引張強さとの間に σ_B (kgf /mm²) $\div$ 1/3 $\times$ HB (ブリネル硬さ) $\div$ 2.1 $\times$ HS (ショア硬さ) $\div$ 3.2 $\times$ HRC (ロックウェルC硬さ) の関係が成り立っている。また、鋼を標準状態にするための熱処理として“焼ならし”がある。焼ならしでは鋼のもって生まれた組織や性質にするため、鋼本来の性質が発現されることになる。

一方、“焼入れ”を施すと鋼は硬くなると同時に脆くなる。実用的完全焼入硬さとして、0.6%C以下の構造用鋼では 最高焼入れ硬さ (HRC) $\div$ 30 + 50 $\times$ %C が得られ、0.6%C以上の工具鋼や高速度鋼では HRC $\div$ 60 ~ 65 でほぼ一定となる。焼入れ放しの鋼は硬いが過大な残留ひずみの影響で引張強さは甚だ低く、硬さに見合う引張強さは得られず、摩耗にも強くないので、その後“焼戻し”を施すことで所定の硬さ(金属組織)にして使用目的に応じた引張強さと靱性を確保し、工業製品部材として実用に供している [調質処理]。

(4) 硬さと高温引張強さ、クリープ特性

金属材料の高温硬さが高温引張特性、クリープ特性等と密接な関係にあること、高温におけるこれらの諸特性に及ぼすひずみ速度の影響が極めて大きいことはよく知られている。川越らは5種の炭素鋼材で、ひずみ速度をパラメータに室温から800℃までのマイクロビッカース硬さと引張強さの関係について、HV硬さ値と8%変形応力 σ_8 との比が同一試験条件下で全鋼種とも500℃まで温度に無関係の一定値をとり、500℃以上では荷重保持時間中のクリープによる硬さ値減少が温度とともに大きくなることを明らかにした⁴⁾。

図8.5は試験力の保持時間を変えて試験した純銅の高温硬さ曲線で、高温クリープ現象がみられるようになる屈曲点温度までは引張強さとビッカース硬さ値に高い相関がみられる。また、図8.6に示したS25C炭素鋼では常温から700℃まで8%変形応力とビッカース硬さで一定の関係がみられ、300℃付近で変形応力が最高値となる青熱脆性も硬さ上昇で硬さ値に反映されている。

(5) 硬さと摩耗特性

材料の摩耗は相手材との組合せや摩耗条件によりその対策も多様であるが、摩耗を材質的または熱処理的に少なくするには硬くすることが第一である [図8.7参照]³⁾。圧延ロールにおける硬さと耐摩耗・耐変形

性については、材料試験研究会のロールカタサ分科会で数多くの研究が行われ成果をあげている⁴⁾。

(6) 硬さと切削加工性

被削材の硬さは切削加工性と密接な関係があり、普通鋼では硬さが低ければ切削加工性はよいが、被削材が耐熱鋼や耐熱合金の場合は常温硬さでは判定できず高温硬さに依存する¹⁾。

(7) 硬さと塑性加工性

塑性加工における加工力は引張強さに比例しているので、硬さと引張強さとの関係から硬さにも比例するといえる。但し、一つの測定値(硬さ、引張強さ、伸び等)のみで塑性加工性を判断することは困難で、複数の測定値が必要となる¹⁾。

(8) 硬さと疲労特性

(3)の図8.3には、炭素鋼・合金鋼の平滑材回転曲げ疲れ限度と硬さ値の関係を静的引張強さと併せ示している。平滑材回転曲げ疲れ限度 σ_w も400HVまでの硬さ範囲で硬さ値と直線関係、 σ_w (kgf /mm²) $\div$ 0.15HV (ビッカース硬さ)、にあることがわかる^{1,2)}。なお、ある硬さ値を超えると疲れ強さが飽和または低下する傾向にあることは、図8.8に示したばね材料においてもみられる⁵⁾。

(9) 硬さとばね特性

ばね限界値は、板ばねの一端を固定し、先端の変位を段階的に変化させて繰返したわみを与え永久たわみが0.075 ~ 0.1 mmを超えるまで試験し、永久たわみ時の表面最大応力Kb (kgf /mm²) で表す。このばね限界値においても図8.9に示すように、ビッカース硬さとほぼ直線的な相関がみられる^{1,4)}。

(10) その他利用

新たな動きとして、超微小(ナノインデンテーション)硬さ試験機による機械特性評価や摺動面を含む強度特性評価において、① 金属(ねじ、極細線材、極薄板、ベアリング)、② メッキ(電極、装飾、保護メッキ)、③ DLC・TiN薄膜(時計ガラス板、メガネ・カメラレンズ、CD、HDD)、④ 半導体(絶縁膜、電極部)、⑤ フィルム材料(表面成膜)、⑥ ヘッド(磁気ヘッド、プリンタヘッド)、⑦ 紙(感光紙、インクジェット用紙)、⑧ 粉(トナー、研磨剤)、⑨ 樹脂材料(成型材、難燃材料、樹脂成膜面)、⑩ 繊維(不織布、合成繊維、毛髪)等で現在測定実績が積み上がりつつある⁶⁾。

〔注〕

1) 平坂正人：“現場における硬さ試験の現状”、日本材料試験技術協会「現場の硬さ試験」講習会テキスト、P. 8-1, 17 (2007) [平成19年]

- 2) 守谷英明：「現場における硬さ試験」、日本材料試験技術協会「現場の硬さ試験」講習会テキスト、P.6-24, 31, 32 (2007) [平成 19 年]
- 3) 大和久重雄：「熱処理のおはなし」、日本規格協会刊、P.93～102 (1982) [昭和 57 年]
- 4) 寺沢正男：「材料と硬さ試験」、材料試験技術研究会「硬さ試験の自動化」講習会テキスト、P.1-3, 4,

11 (1977) [昭和 52 年]

- 5) 西畑三樹男：「材料試験基礎のきそ」、日刊工業新聞社刊、P.47 (2008) [平成 20 年]
- 6) (株) エリオニクス技術資料：超微小押込み硬さ試験機の主な使用目的(測定実績)、P.1 (2008) [平成 20 年]

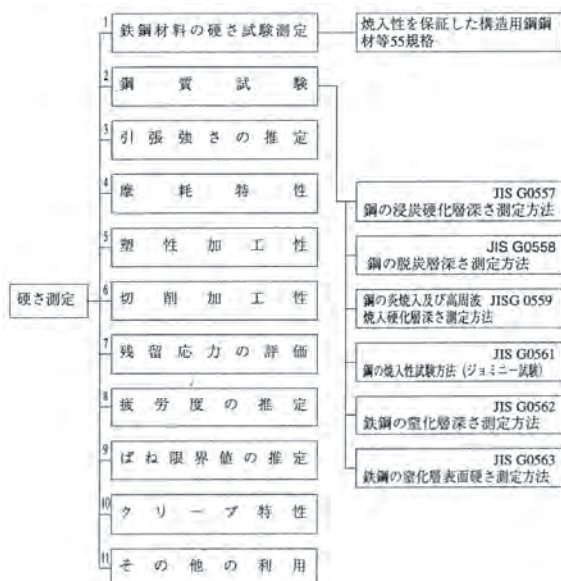


図8.1 硬さ測定による材料特性評価¹⁾

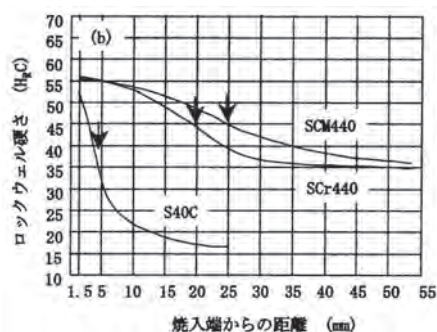
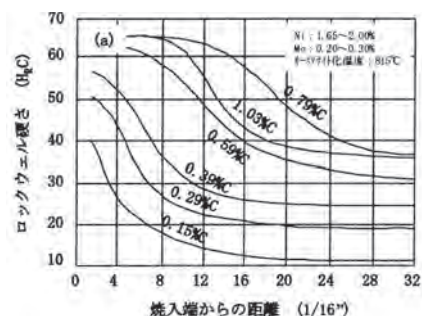


図8.2 ジョミニ曲線（焼入特性図）²⁾

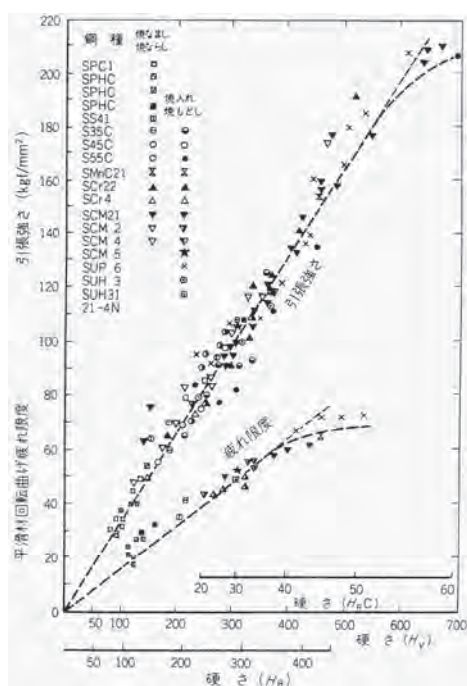


図8.3 炭素鋼・合金鋼の硬さと引張強さ、疲れ限度¹⁾

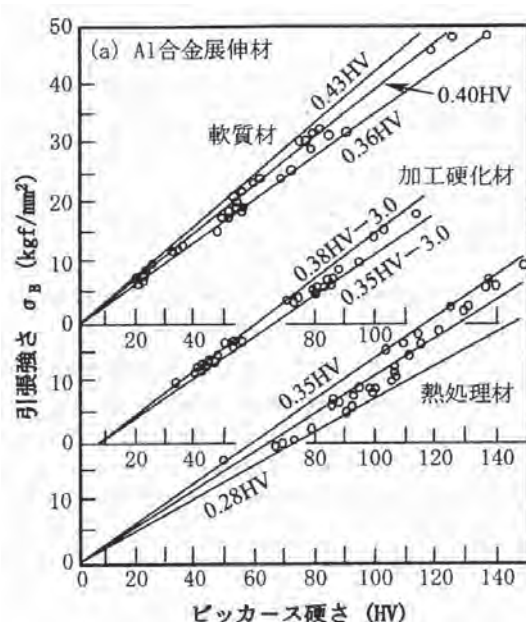
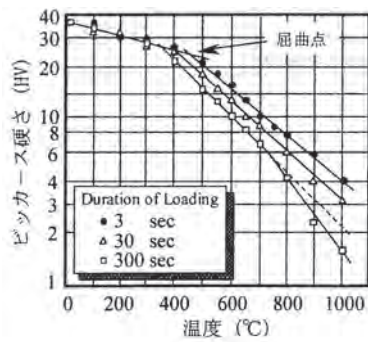
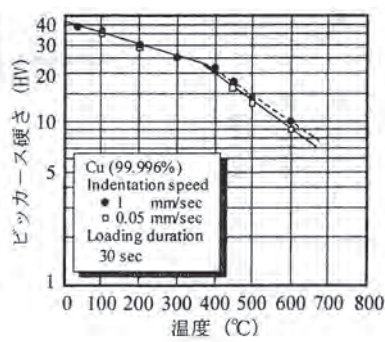


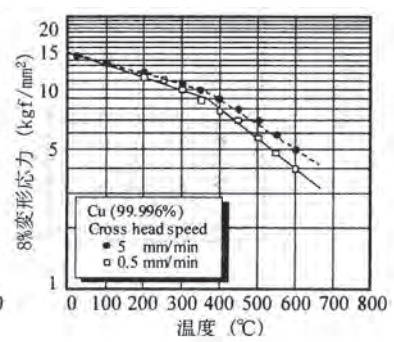
図8.4 アルミ合金展伸材の引張強さと硬さ²⁾



(a) 保持時間の影響

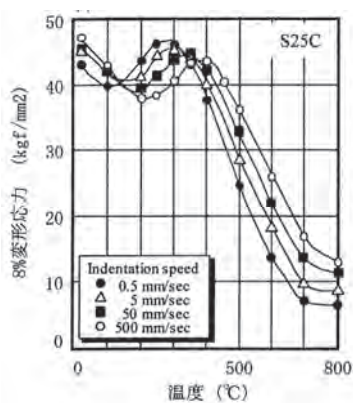


(b) 押込み速度の影響

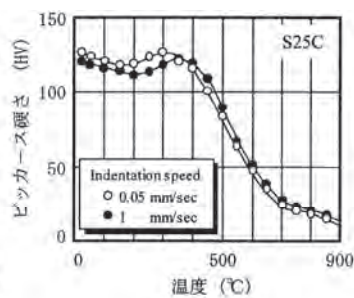


(c) 負荷速度の影響

図8.5 純銅の硬さ、引張強さの温度依存性²⁾



(a) 変形応力



(b) ビッカース硬さ

図8.6 S25C炭素鋼の硬さ・変形応力の温度依存性²⁾

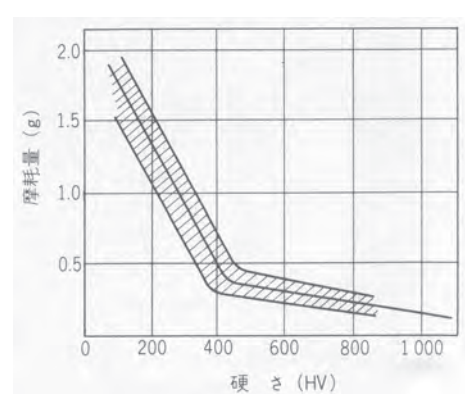


図8.7 各種鋼材の硬さと摩耗量³⁾

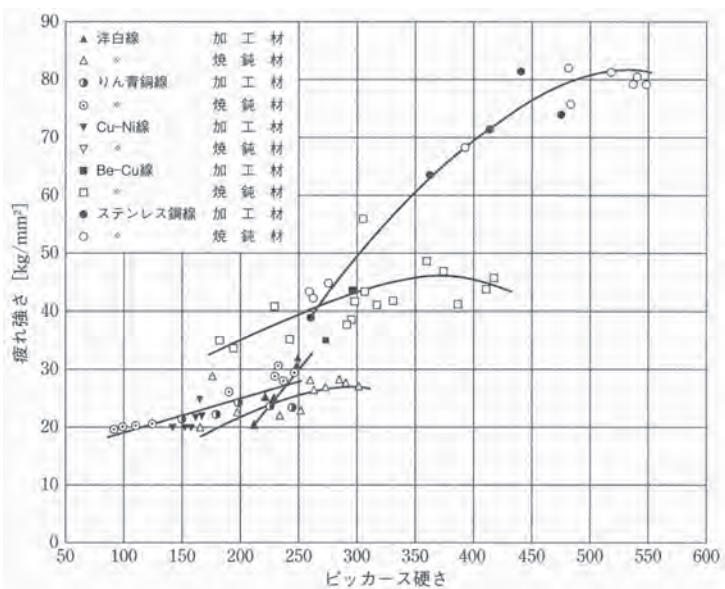


図8.8 ばね材料における硬さと疲れ強さ⁵⁾

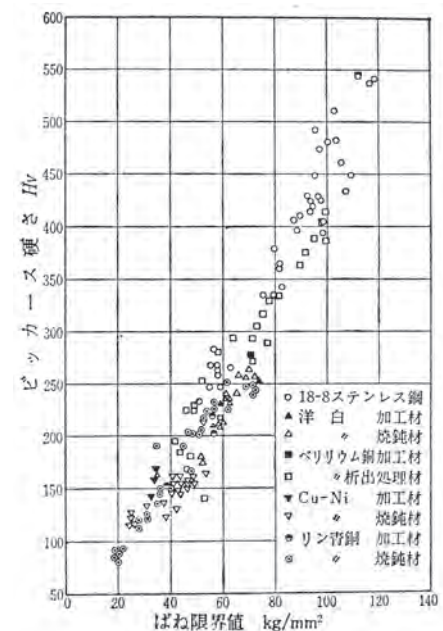


図8.9 硬さとばね限界値(線径φ1mm)⁴⁾

9 | 硬さ試験の国際標準化

第2次大戦後、急速な復興を遂げた日本、ドイツを含め、主要工業国では硬さ試験が広範囲に使われるようになり、別々の工場や試験所で得られた試験結果の合致性が問題になってきた。その結果、硬さ試験の標準化が関連産業の緊急課題となり、先進工業国では国内及び国際的な標準の確立が強く求められるようになった。この標準化には、工業規格の確定と測定標準としての硬さ標準の確立という2つの側面があった。我国では1950年代に一通りの規格が揃っていたが、国際的な整合性は国際組織の活動を待たねばならなかった。硬さ試験の国際標準化では我国も、計量研究所（現・産業技術総合研究所）が窓口となり、官民一体で積極的に活動してきた。図9.1には、以下で述べる硬さ標準に関わる国際組織の活動変遷を示す¹⁾。

9.1 国際標準化組織での活動

9.1.1 国際標準化機構（ISO）

硬さ試験は材料試験の一種であるため、国際的立場での標準化は最初、国際規格を審議するISOの金属関係、特に鉄鋼の技術委員会ISO/TC17が熱心に取り組んだ。1960年代末にはTC17/SC5が表9.1の構成で大方の規格を纏めたが、当時の制度上、まだ勧告規格（ISO/R）どまりであった。その後、1975年の組織替えて金属材料試験の規格化は金属の機械試験全般を所掌する技術委員会ISO/TC164が一括担当となり、現在に至っている（硬さ試験：小委員会SC3）。その間、1986～1993年（昭和61～平成5年）まで日本が幹事国を受け、計量研の飯塚幸三がTC議長を務めた（事務局：日本規格協会）。

表9.2には現在のISO規格の構成を示す。ヌーブ硬さが独立し、計装化押込み硬さが加わっているが、各試験法毎に試験方法、試験機、試験機校正用基準片の3規格構成は1960年代と変わらない。過去30年以上、ISO/TC164/SC3は硬さの標準化実現を目標に該当規格の一層の精密化に努めてきたが、その特徴は基本的に産業現場のニーズに応えるための規格化であったといえる。もう一つの重要な役割は、便宜的な方法で決められている硬さを国際的な合意（約束）で定義付けしている点にある。すなわち、ISO規格による硬さの定義は、実用性を重視するとしても、同時に硬さ標準の基礎にもなり、硬さに関する取り決めの基盤を提供するものでなければならない。その意味で硬さ関連の

他国際組織（以下の3組織）との更なる協力・連携や硬さ定義に関する合意（確認）が望まれる¹⁾。

9.1.2 国際法定計量機構（OIML）

計量分野の文書規格を扱うもう一つの国際機関として、1955年に設立され、1961年（昭和36年）に我国が加盟したOIMLがある。この構成メンバーは各国の法定計量機関で、OIML文書はISO規格に比べ、計量機器の法的規制や検査方法に重点がある。そのため、各国の計量標準研究所の多くがOIMLの活動に参加し、勧告文書の作成に協力してきた。文書作成は当初、提案幹事（PS）と実務幹事（RS）の2層構成で進められたが、1993年から現在のTC/SC体制に変更された。硬さや硬さ試験は多くの加盟国で法規制の対象となり、現在は圧力・力関連量測定技術委員会TC10の小委員会SC5（幹事国 アメリカ）が勧告文書の作成を担当している。このような背景で、PSとRSは、1990年代末にメートル条約下の組織が硬さに取組むまでは、各国計量研究所が硬さの共同研究や相互比較を実施するために便利な機関として利用されてきた。

1950年代には、産業界から硬さ標準の実現・供給が要請され、ヨーロッパ各国の計量標準研究所や材料試験所のいくつかが標準の確立を目指してビッカースやロックウェル硬さ用の標準試験機を試作した。先行したのはドイツ 州立材料試験所（MPA）のK. Meyerが1957年に開発したロックウェル硬さ標準試験機で、1958年にはイギリス国立物理研究所（NPL）のR. S. Marrinerがビッカース硬さ標準試験機を完成、ロックウェル硬さ標準試験機の試作を開始した。これらの標準試験機はいずれも実荷重で圧子を押込み、くぼみの大きさや深さを光学的に（後に電子式に変更）読み取る構造を特徴としていた。我国では1958年（昭和33年）、計量研の山本健太郎、矢野宏らが単一レバー式の精密な負荷機構を持つロックウェル硬さ標準試験機を開発した。押込み硬さにおいては荷重（試験力）よりも圧子の形状誤差の影響が著しいことは以前から指摘されていたので、各国の研究所は標準圧子を選択するための圧子形状の精密測定法や測定装置の開発に競って専念した。硬さ標準に対する計量標準研究所の考え方は、硬さの定義と各影響量の許容差を正確に守った試験機と圧子を実現し、できるだけ均一な硬さ基準片に値付けをすることであった¹⁾。

硬さ標準の実現で、その値と他所との標準、更には

市販の試験機の指示との比較が次の関心事となった。1957年、MPAのK. Meyerが初めてロックウェルC硬さの国際的な相互比較を実施した。1960年代には我国の計量研がロックウェルC硬さの国際比較を実施、1966年（昭和41年）にその結果をOIML硬さ作業部会のウィーン会議で山本所長が報告してOIMLが計量標準国際比較の実行組織になり得ることを示し、その後各国計量標準研究所の共同研究の場として活用されるようになった。なお、現在では国際比較等の共同作業の場は国際度量衡委員会（CIPM）に移行し、OIMLの主要な関心は計量器の型式試験や計量器そのものの相互承認に移っている。表9.3には現在OIMLが発行している硬さ関係の国際勧告文書を示す¹⁾。

9.1.3 国際計測連合（IMEKO）

IMEKOは1958年に創設された各国計測関係学術団体の連合組織で、我国からは計測自動制御学会が加盟している。IMEKO世界会議（World Congress）はこれまでに計18回開催され、第15回世界会議は1999年（平成11年）に日本（大阪）で開催された。創立以来、硬さはその主たる活動対象ではなかったが、第6回総会の理事会でIMEKO/TC5（第5技術委員会）として「硬さ」が正式に認められ、第7回総会からは総会時に毎回、TC5の硬さセッションまたは円卓討議が設けられるようになった。

ヨーロッパ各国の硬さ研究者はIMEKO設立以前から国際交流を行っており、1952年にはドイツで第1回硬さ試験ワークショップがドイツ技術者協会（VDI）の関係者により開催され、1959年（昭和34年）の第3回ワークショップでは日本から論文7編が発表された。これが我国硬さ試験の研究成果が欧州に伝えられた初めての機会と考えられる。第5回ワークショップはIMEKO協賛の硬さシンポジウム（第1回HARDMEKO）として1970年（昭和45年）に開催され、計量研の飯塚らはショア硬さ用標準ハンマーについて発表した。IMEKO/TC5発足後の硬さシンポジウムはIMEKOの協賛または共催となり、これまでに計10回、2007年（平成19年）の第10回シンポジウムは日本（つくば市の産総研）で開催された。IMEKOは硬さ試験の規格作成や硬さ標準の相互比較を実行する組織ではないが、硬さの定義や硬さ標準の実現方法と不確かさの評価、硬さ試験機の校正方法、新しい試験機・試験法・測定法の開発、新材料の開発や生産工程の管理等での硬さ試験利用等広範な話題について、学術・技術的見地から討議する場として今後も重要な役割を果たすことが期待される^{1~3)}。

9.1.4 国際度量衡委員会（CIPM）

CIPMはメートル条約に基づく国際度量衡総会の決定事項を執行する委員会で、国際度量衡局の管理監督や決定事項の具体的または詳細な取り決めの策定等を任務としている。国際単位系（SI）は、物理法則と原理に基づき定義された単位系であり、1948年の第9回総会の決議を受けて順次提案・決定され今日に至っている。このような任務の性質上、硬さのような便宜的に決められた量について、CIPMは長年関心を持たないでいた。しかし、1993年に物理量諮問委員会（CCQM）の設置が決まり、1995年の第20回総会で計量標準の国際比較により世界的なトレーサビリティを確立することが決議され、各量毎に各国標準の同一性を見極めるための国際比較（基幹比較）の実施が促進されるようになった。

1997年にはイタリア計量研究所の提案により硬さの国際比較を検討する臨時作業部会（主査：計量研の飯塚）が設置され、各国の計量標準研究所に対し硬さ標準のアンケートを実施した。この作業部会には硬さ試験関係で活動していた国際組織（ISO/TC164/SC3、OIML/TC10/SC5、IMEKO/TC5）の代表を含め、主要な研究所の研究者が参加、1998年にアメリカの国立標準技術研究所（NIST）で第1回会合が開催された。1999年にはCIPMでその活動実績が認められ、このグループが質量関連諮問委員会（CCM）所属の作業部会（WGH）として正式に承認された。なお、1999年は計量標準の相互承認取り決め（MRA）がCIPM総会で決定・発足した年でもある。以後、各国硬さ標準の相互承認制度が発足したことを受け、その同一性を確認するための国際比較の実施という重要な役割を担い今日に至っている¹⁾。

9.2 試験機、基準片のトレーサビリティ

現在、ロックウェル、ビッカース、ブリネル硬さのJIS規格は全てISOへの整合化見直しを終了しているが、産業グローバル化（海外にも有効な国際的な相互認証）に対応し、硬さのトレーサビリティを構築する上で、ISOの国際共通ルールと併せ、各国工業規格の規範に相応しい内容見直しが求められている^{4,5)}。このような背景のもと、日本試験機工業会では1996年（平成8年）に「硬さ標準トレーサビリティ研究会」を発足させている。なお、我国の“ショア硬さにおけるJIS規格HV—HS換算方式”のような工業的基準の成功は国際的にも特異な事例といえる。

最近は、硬さのトレーサビリティにおいて社会認証の要求も高まり、従来の計量基準と共に、硬さ基準片の併用が一般に普及している。現在 我国の硬さ基準片メーカーでは、基準片の国家標準は工業標準化法（JIS）に準拠し、図 9.2 に示すような“力と長さ”による ISO 基準片規格に基づくトレーサビリティを確保、その品質保証体系について外部審査機関による ISO 9000 シリーズの認証を受けている。このトレーサビリティ体系では、図中左側の力・長さ等 計量基準による“直接精度”と、右側の硬さ基準片による“間接精度”の 2 つの系列がある^{6~8)}。

また、各種試験機の検証精度は概略、表 9.4 のように例示され、力、長さが表の規格許容差内であれば、硬さ基準片による間接精度も同様に合致する。但し、その際、負荷条件で注意を要する。国際的には、試験力の負荷速度、保持時間で短時間側のアメリカと長時間側のヨーロッパでは硬さ値に明確な差異があり、どちらの測定の方が合理的とみるかで選択の余地がある⁷⁾。各国研究機関による基準片での国際比較はロックウェル、特に HRC 硬さを中心に、古くから多くの努力がなされてきたが、研究の経緯（負荷方式等）や法的取組みで国により多少の違いがあり、短期日内に全てのスケールで硬さの“相互認証”を実現することは現状では難しい^{9, 10)}。このような事情により現時点では、ISO 規格で広い条件が認められているが、負荷条件の統一化が進めば、この基準片の問題に関しては大幅な改善が期待できる。

[注]

- 1) 飯塚幸三：“硬さ測定をめぐる世界の活動の歴史的展望（CIPM, IMEKO, OIML および ISO の活動）”、材料試験技術、Vol. 53, No. 2, P. 60 ~ 68 (2008) [平成 20 年]
- 2) 寺沢正男：“VDI/VDE IMEKO 硬さ試験の理論と応用に関する国際会議”、計測自動制御学会、計測と制御、P. 940 (1978) [昭和 53 年]
- 3) 高木智史：“HARDMEKO 2007 国際会議報告”、材料試験技術、Vol. 53, No. 2, P. 53 ~ 59 (2008) [平成 20 年]
- 4) 硬さ研究部会報告：“第 28 回 硬さに関する懇話会：ISO 9000 シリーズと硬さについて”、材料試験技術、Vol. 38, No. 2, P. 141 ~ 146 (1993) [平成 5 年]
- 5) 硬さ研究部会報告：“第 31 回 硬さに関する懇話会”、材料試験技術、Vol. 43, No. 2, P. 146 ~ 147 (1998) [平成 10 年]
- 6) 山本 普：“硬さ基準片（今日の課題）”、材料試験技術、Vol. 38, No. 1, P. 5 ~ 6 (1993) [平成 5 年]
- 7) (株)山本科学工具研究社：技術資料「硬さのトレーサビリティ体系(図)」、P. 1 ~ 2 (2003) [平成 15 年]
- 8) 山本 卓：“硬さ基準片の信頼性向上の研究と展望（硬さばらつきゼロの研究）”、力学量標準トレーサビリティ・ワークショップ[IX]、P. 1 ~ 9 (2007) [平成 19 年]
- 9) 樋田並照：“計測の不確かさ（硬さ試験の場合）”、材料試験技術、Vol. 42, No. 4, P. 230 ~ 236 (1997) [平成 9 年]
- 10) 高木智史：“硬さ試験における国際規格の動向”、材料試験技術、Vol. 53, No. 2, P. 83 ~ 85 (2007) [平成 19 年]

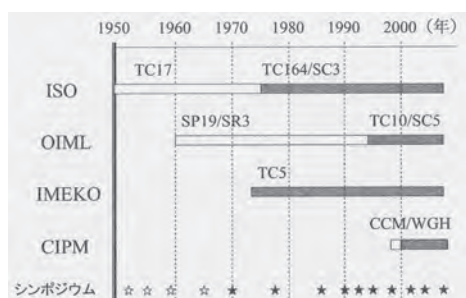


図9.1 硬さ標準に関わる国際組織の活動変遷¹⁾

表9.1 ISO/TC17:硬さ試験関係の勧告規格
(1960年代末)¹⁾

[規格番号/制定年]

硬さ	試験法	試験機検査法	基準片の校正
ブリネル	R79/1968	R156/1967	R726/1968
ビッカース	R81/1967	R146/1968	R640/1967
ロックウェル B&C	R80/1968	R716/1968	R674/1968
ロックウェル N&T	R1024/1969	R1079/1969	R1355/1970

表9.2 ISO/TC164/SC3:硬さ関係の規格番号(現在)¹⁾

硬さ	試験法	試験機検査法	基準片の校正
ブリネル	6506-1	6506-2	6506-3
ビッカース	6507-1	6507-2	6507-3
ロックウェル A,B,C,・N,T	6508-1	6508-2	6508-3
スーパ	4545-1	4545-2	4545-3
計装化押込み	14577-1	14577-2	14577-3

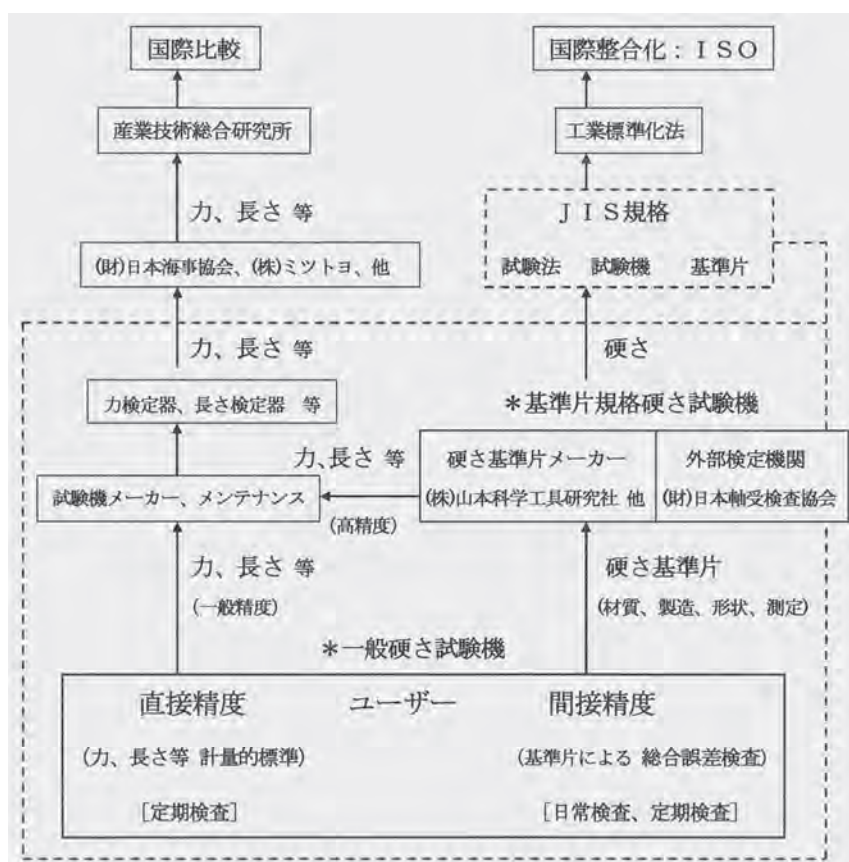
表9.3 OIML:硬さ関係の勧告文書¹⁾

[番号/制定年]

硬さ	圧子	試験機の 検定	基準片の校 正と試験
ブリネル	R36/ 1976	R37/1976	R9/1968
ビッカース	同上	R38/1976	R10/1968
ロックウェル A,B,C,F,N&T	同上	R39/1976	R11&12/ 1968

表9.4 各種硬さ試験機による検証精度の例⁷⁾

硬さ 試験機 規格	ブリネル JIS B 7724 : 1999 ISO/6506-2 : 1997	ビッカース JIS B 7725 : 1997 ISO/6507-2 : 1997	ロックウェル JIS B 7726 : 1997 ISO/6508-2 : 1999	ショア JIS B 7727 : 2000 —
直接検証	力: ±1.0% 測定装置: ±0.5% 他:	±1.0~1.5% ±0.01 d	±1.0% ±0.5HR ダイヤ圧子±0.8HR	附属書 1(HSD), ハンマ落下高さ: 約 19mm, ハンマ質量: 約 36.2g HS=140×h/h ₀
間接検証	125~225HB ±0.025H	500HV0.3 8% 500HV1 5% 500HV10 3%	±1.5HRC	75HS 以上 ±1.5HS

図9.2 硬さのトレーサビリティ体系図⁷⁾

10 | むすび

最近、日常生活に影響の大きい工業製品の損傷事故やクレームが新聞、テレビで大々的かつ詳細に報道されるようになり、工業製品の“安全・安心”に対する社会認識が深まりつつあり、製造物責任も厳しく問われる時代となってきた。ものづくりの世界では硬さ試験はその材料強度信頼性を陰で支える縁の下の力持ち的存在ではあるが、産学官の関係者に共通し、かつ、一貫したものとして、ものづくり技術への熱い思いがある。本調査研究では、これが原動力となって第2次大戦後の産業復興期以降、従来の海外オリジナルメーカー製品の模倣から脱皮し、独自の発達を遂げ、今日では世界をリードするまでになった我国の硬さ試験機の開発とその変遷を明らかにした。また、これを可能にした背景として、① 産学、産官連携による試験機開発や試験機メーカー間の切磋琢磨による創意工夫（負荷・計測機構）とその知的財産化（特許、実用新案によるガード）、② 国内素材メーカーの優れた材料製造技術と町工場が保有する高レベルの機械加工技術、熱処理技術、③ 世界をリードする我国のセンサー技術（荷重、変位計測）や画像処理技術（圧痕形状計測）等の基盤技術、④ 顧客（材料・機器の研究開発やものづくり現場）からのより高度な硬さ試験へのニーズがあったことも今回の調査を通してよく分かった。

硬さ試験は材料の加工、熱処理、使用寿命等を知る上で便利な手法で、通常、数値で硬い、軟らかいを判定するが、鉄鋼材料のようにデータの多いものでは硬さの数値をみれば、成分、熱処理、強さまでほぼ分るものである。これは長年にわたり先人達が築き上げた実績による成果であって、今日の新材料や半導体のような複合材料では硬さの本質や利用方法についてはその数値だけでは分らない面がある。数値とは別な、圧痕形状、変形模様、方向性、き裂、組織との関連等を同時に調査・考察することで、その現象を自分なりに自由に解釈することが大切である。また、これが新しいものづくりに対する試験技術と言える¹⁾。

今回の調査内容を踏まえ最近の“ものづくり”状況を鑑みると、我国工業製品の材料強度信頼性を下支える“材料試験硬さ技術”を今後さらに発展させるためにやるべきこととして、① 硬さ測定技術の着実な継承、② 硬さ試験機の測定精度向上とその計測自動化、③ 硬さ試験適用分野の拡大、④ 国際標準化活動の推進、⑤ 硬さ現象の本質的な解明（普遍的に認められる“硬さ”の定義確立）等が考えられる。この関

係で今後も産学官が連携して取組めるものとして、試験・評価技術の開発、“新分野”の試験機開発、成果発表・製品紹介（シンポジウム、展示会）、啓発・普及活動（講習会、技術指導）等があり、この“新分野”対象材料には金属、プラスチック、セラミックス材料の微小部材や極薄板・薄膜（表面被膜、積層膜）、それらの複合材料等が、“試験環境”には常温大気中のみでなく、極限環境下（極高温または極低温で外部負荷と腐食性雰囲気重量作用するような場合）等が想定される。また、試験・評価技術や試験機開発と併せ、蓄積したデータに基づき JIS・ISO 等の新規格を積極的に提案し、これが承認・実施に至れば、我国工業製品の強度安全性や国際競争力の向上に多大の貢献ができることになる。産業グローバル化の観点からは、特に部品レベルでの国際分業で、その品質保証上、検査に用いられる硬さ試験機や基準片のトレーサビリティもより重要視されるようになるであろう。硬さ試験の適用分野拡大という立場からは、今後も産業界のニーズに的確に対応すべく、硬さ関係者が引張、疲労、クリープ、摩耗、ばね特性、焼入性、溶接性試験等の材料強度評価技術にも深く関わり、硬さと機械特性との相関性をさらに探究していくことが強く望まれる。

なお、本調査研究に際し、著者は、硬さ試験機・基準片のメーカーとそのユーザー、硬さ研究者等を多数訪問し聞き取り調査や試験機の所在調査、技術資料・カタログ・文献等の収集調査をさせていただいた。ここに改めて御協力いただいた方々、日本ベルパーツ（株）西畑三樹男氏、國峯辰雄氏、崎田栄一氏、（株）山本科学工具研究社 山本 卓氏、（株）ミツトヨ 小島光司氏、澤 健司氏、（株）島津製作所 山本靖則氏、前田豊一氏、（株）エリオニクス 本目精吾氏、島 義和氏、（有）テクトロニクス 荒瀬 昇氏、JFE テクノリサーチ（株）丸山久助氏、JFE スチール（株）豊永正敏氏、工学院大学 小林光男氏、武蔵工業大学 白木尚人氏、元・東京大学 関谷三郎氏、高野太刀雄氏、福島義明氏、産業技術総合研究所 山口幸夫氏、元・東京都立産業技術センター 佐々木武三氏、日本計量振興協会 今津好昭氏、日本試験機工業会 松本知典氏、に謝意を表する。

[注]

- 1) 西畑三樹男：“材料試験は産業の基盤を創る力がある”、材料試験技術、Vol. 51, No. 4, P. 236 ~ 238 (2006) [平成 18 年]

国立科学博物館 技術の系統化調査報告 第14集

平成21(2009)年5月29日

- 編集 独立行政法人 国立科学博物館
産業技術史資料情報センター
(担当：コーディネイト・エディット 永田宇征、エディット 大倉敏彦・久保田稔男)
- 発行 独立行政法人 国立科学博物館
〒110-8718 東京都台東区上野公園 7-20
TEL：03-3822-0111
- デザイン・印刷 株式会社ジェイ・スパーク