

鉄鋼の信頼性向上技術の系統化調査

The History of Technology to Enhance the Reliability of Steel

長井 寿 Kotobu Nagai

■要旨

人類はまず自然から原材料を採取した。19世紀以降は地下資源から作った人工材料が主となる。21世紀では再生可能、循環型資源への期待が高まっている。「与えられた条件の下で、与えられた期間、故障せずに、要求どおりに遂行できる能力」である信頼性の向上もますます重要になる。そのためには破損、損耗を最小限化しなくてはならない。構造材料としての鉄鋼には低価格と高強度利用が期待される。高強度利用は構造物の軽量化および省材料化を同時実現する。ところが、高強度利用には脆性、疲労、腐食、高温クリープなどへの耐性の低下がつきまとう。これらの耐性を高めることが信頼性向上に直結する。鉄鋼の「ハイテン化」は、各用途分野で「使える高強度」の限界を改善した積み上げの歴史である。

技術開発は失敗や事故などのマイナス面の歴史でもあり、100 %の安全・安心はあり得ない。そのため、設計者は材料が使用される条件や環境を理解し、それらの条件に合う材料を選択する必要がある。素材の製造者や提供者はその限界を正しく理解し、関連する情報の公開と普及に努めなければならない。そうすると設計者と材料提供者のコミュニケーションと協力が容易になり強化される。ひいては「使える高強度」のさらなる上昇につながる。その効率的な展開のために、どのような指標が連携および信頼性向上に適しているのか歴史的に検討されてきた。現時点で指標は100 %完成とは言い切れないが、その方向性は明白である。

西欧に始まった産業革命以降、鉄鋼は安価さと便利さからいろんな用途に大量に利用された。しかし鉄鋼は「完全無欠」ではなく破損、損耗の事例が相次ぐ。それでも鉄鋼が幸運だったのはその弱点を克服できたことである。徐々に改良が積み重なった。信頼性向上のためには物理・化学は勿論のこと、機械工学の発展が鍵になっている。さらに新しい科学理論や観察手段なども動員された。弾性論から材料力学が発展した。そこに脆性的でない鉄鋼が出現し塑性変形に関心が向くようになった。しかしさらに一歩進んで耐破損性にまで関心がなかなか及んでいない。耐破損性への接近は、まず脆性破壊に始まる。「遷移曲線」と呼ばれる耐破損性の整理（経験論）がいち早く定着し、「耐き裂性」についての基本的考え方（理論）も提案された。疲労では「ヴェーラー線図」と呼ばれる耐破損性の評価手法が見出された。これらは信頼性向上技術の観点からは特筆すべき前進だった。時代が進み、科学者や技術者が専門家集団として現れ、大学の充実、基礎研究所の設置、統一規格に向けた国際会議の始まりなども必然的に起こった。

西欧に遅れをとった日本では、鉄鋼技術において民間産業が主導的な役割を果たしてきたといっても過言ではない。一方、公的研究機関も重要な役割を果たしてきた。大学や研究機関は基礎研究において重要なだけでなく、鉄鋼の信頼性向上技術の進歩のために複数の専門分野の連携にも大きく寄与した。また、学会や公的研究機関は、一企業ではできない大規模な実験や長期試験、産官学連携の研究の実施主体となった。このように学会や公的研究機関の寄与は大きかった。

戦前の日本では、順次試験設備等の整備が進み、経験が蓄積し始めた。しかし、基礎現象の把握という点では、試験設備の改善、工夫がしやすかった脆性分野では日本独自の知見もあったが、疲労のように試験法の統一が遅れた分野では得られた知見は経験的理解でしかなかった。戦後になると欧米の知見が総合的に理解されるようになり、1950年ごろまでには少なくとも知識の上では欧米とほぼ同じ地平に到達していたと思える。それに続く半世紀で大きな発展を遂げ、欧米に比肩してグローバルリーダーのプレゼンスを占めるに至っていると自負できる。本稿では、脆性破壊、高サイクル疲労、大気腐食、高温クリープについて詳述する。

鉄鋼の信頼性向上技術には、材料力学と材料科学の連携が不可欠である。技術の成長期では製造者が関わる三角形が大きな役割を果たすが、技術の成熟期では需要家もしくは使用者が関わる三角形も重視しなくてはならない。この二つの三角形が有機的に繋がることで、より安全・安心で豊かな社会が持続的に運営されていくだろう。これらの三角形を切り結び役目を果たす、学協会、公的研究機関による具体的な貢献が今後ますます重要になると思われる。自然環境の多様性や耐破損性・耐損耗性を許容条件への反映を考慮した国際標準への期待が高まる。同時に、数値シミュレーション、データ科学の活用も重要である。

■ Abstract

Humans first collected raw materials from nature. Since the 19th century, though, humans have mainly used materials made from resources underground. In the 21st century, there are growing expectations for the use of renewable and recyclable resources. Improving reliability, which is the ability to perform as requested under given conditions for a given period of time without failing, will also become increasingly important. To that end, damage and wear must be minimized. As a structural material, steel should be very strong and inexpensive. The use of a high-strength material in a structure simultaneously reduces its weight and conserves the materials used. However, increased strength reduces resistance against brittleness, fatigue, corrosion, and high-temperature creep. Improving resistance to these phenomena is directly linked to improving reliability. The development of high-strength steel is a history of increased limits of usable high-strength steel in each field of application.

Technological development is also a history of negative outcomes such as failures and accidents. In any case, achieving perfect safety and reliability is not possible. Therefore, designers must understand the conditions and environments in which a material will be used, and select materials to meet those conditions. Manufacturers and providers of materials must have a correct understanding of the limitations of those materials and disclose and share relevant information. This will facilitate and enhance communication and cooperation between designers and material providers. In turn, this will lead to a further increase in "usable high-strength" materials. Therefore, the indices that are suited to increased cooperation and improved reliability have been historically examined. The indices are not 100 % perfect at this point, but the direction is clear.

Since the Industrial Revolution began in Western Europe, steel has been used in large quantities for various purposes due to its low cost and convenience. However, steel is not "perfect," and there are numerous examples of its fracturing and wear and tear. Nonetheless, steel has luckily overcome its weaknesses. Gradual improvements have been made. In addition to advances in physics and chemistry, advances in mechanical engineering have been the key to improving the reliability of steel. Moreover, new scientific theories and observational techniques have also been put to use. The mechanics of materials developed from the theory of elasticity. Non-brittle steel emerged, and interest turned to plastic deformation. However, interest had not yet reached fracture resistance, which is a step further on from plastic deformation. The approach to fracture resistance begins with brittleness. Identification of fracture resistance via a method known as the "transition curve" (an empirical theory) was quickly established, and the basic concept (theory) of "crack resistance" was also proposed. A technique for evaluating fatigue known as the "Wöhler curve" (S-N curve) was identified. These were remarkable advances from the standpoint of technology to improve reliability. Over time, scientists and engineers emerged as a group of experts. The expansion of universities, the establishment of basic research institutes, and the beginning of international conferences to unify standards inevitably occurred.

Private industry has undoubtedly played a leading role in steel technology in Japan, which has lagged behind Western Europe. That said, public research institutes have also played an important role. Universities and research institutes are not only important to basic research, but they have also greatly contributed to collaboration among specialized fields in order to advance technology to improve the reliability of steel. Moreover, academic societies and public research institutes have become the main entities conducting large-scale experiments, long-term tests, and collaborative research involving industry, government, and academia that cannot be done by a single company. This is how academic societies and public research institutes have made a significant contribution.

In pre-war Japan, testing facilities gradually improved and experience was being gained. In terms of grasping basic phenomena, Japan had unique knowledge in the field of brittleness, where test facilities and approaches were easy to improve and devise. In fields such as fatigue, however, standardization of testing methods was delayed and the knowledge obtained was only an empirical understanding. After the war, Western knowledge was comprehensively understood, and by around 1950, Japan seemed to have reached the same level of knowledge as in the West. In the half-century that followed, Japan has made major advances, and Japan can proudly say that it now holds a position as a global leader on par with Europe and the United States. This paper describes brittleness, high-cycle fatigue, atmospheric corrosion, and high-temperature creep.

Collaboration between material mechanics and materials science is essential to technology to improve the reliability of steel. When a technology is developing, manufacturers play a major role. When a technology is mature, consumers or users must also be emphasized. A safer, more secure, and more prosperous society can be operated sustainably by organically linking these two groups. Academic societies and public research institutes play a role in connecting those groups, and specific contributions by those societies and research institutes will become increasingly important in the future. There are mounting expectations for international standards that take into consideration the diversity of the natural environment and the inclusion of fracture and wear in allowable conditions for materials. At the same time, use of numerical simulation and data science will also be important.

■ Profile

長井 寿 *Kotobu Nagai*

国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任調査員

1974年	東京大学工学部金属工学科 卒業
1977年	東京大学工学系大学院金属材料学科修士課程 修了
1977年	東京大学工学部助手
1981年	工学博士（東京大学）
1981年	金属材料技術研究所
2001年	物質・材料研究機構に統合
2002年	同 超鉄鋼研究センター長
2012年	同 構造材料研究拠点長
2017年	同 退職
2018年	同 名誉研究員

■ Contents

1. はじめに	238
2. 構造・材料の破損、損耗	239
3. 安価で加工しやすい鉄鋼	244
4. より高強度の壁は信頼性向上	251
5. 信頼性向上のための科学と技術の プラットフォーム	259
6. 脆性破壊	268
7. 高サイクル疲労	276
8. 高温クリープ	287
9. 大気腐食	298
10. まとめ	305

1 | はじめに

鉄鋼は利用範囲が広く、利用量も大きく、多面的多層的に人類の経済と生活を支えてきた。日本には古くから和鉄の技術があった。そこに西洋式の鉄鋼の大量生産技術(1855年 ベッセマー転炉製鋼法)が導入(1887年 釜石鉾山田中製鉄所、1901年 官営八幡製鐵所)された。1972年に粗鋼生産量が1億トンを超えて、それ以降はその生産水準を維持している。今後、人口減に伴う需要減などにより生産量は長期的には減少していくが、材料製造量全体に占める比率は低下せずその重要性は変わらないと言われている。

鉄鋼は主に構造物の構成材料すなわち構造材料となる。構造材料は高い荷重に耐えなくてはならない。自重で崩壊するのは論外であるが、その材料強度を高めても使用中に形状を保てなくなったり、破壊したりすることがある。ここで破損は構造の変形もしくは破壊で全体の機能が失われること、損耗は損傷によって機能が失われることを言う。破損、損耗を避けるために経験的にそれらの恐れのない低い荷重条件で使うことが多い。もし、より高い荷重条件で使えれば原材料を節約してかつ構造物を軽量化できる高いメリットが得られる。一般によく理解されていないが、「高強度化」というのはより高い荷重条件で使用可能にすることであり、必ずしも「高い材料強度」を意味しない。材料強度が高いほど耐破損性、耐損耗性が低下する傾向があり、材料強度の上昇は逆効果となってしまうことが多いと正しく把握する必要がある。

本稿では「信頼性向上技術」という切り口から鉄鋼がこの課題に向かい合ってきた歴史を見つめ直し、耐破損性、耐損耗性を高める実践的な指針をどのように獲得してきたかを整理することで、今後のさらなる高強度利用に役立つ視点を導き出したい。信頼性とは、JIS Z 8115「ディペンダビリティ(総合信頼性)用語」¹⁾で「アイテムが、与えられた条件の下で、与えられた期間、故障せずに、要求どおりに遂行できる能力」と定義されており、耐破損性、耐損耗性の社会的意義を捉えるのに格好の概念である。

鉄鋼の信頼性向上技術の課題は無数にあるが、本稿では、高強度利用を前提として、破損、損耗の原因として特に重要な、脆性破壊、高サイクル疲労、大気腐食、高温クリープを詳しく取り上げる。使用環境下での材料への負荷には、非時間依存型(衝突など)と時間依存型がある。時間依存型には電気化学的負荷(大気腐食など)、力学的負荷(高サイクル疲労、高温クリー

プなど)、および本稿では取り上げないがそれらの複合負荷がある。一般的に時間依存型は、試験に長時間必要な上に考慮すべき条件が複雑なこともあり、短時間で研究の成果が出ることはない。そのこともあり一般社会の注目を浴びにくい、地味な分野である。しかし、安全・安心で豊かな社会の構築に不可欠なものであるとの理解と関心をいくらかでも広げることに本稿は貢献したい。

信頼性は社会的に「持続可能性(Sustainability)」とも密接な関係を持つ。持続可能性とは、環境や社会、人々の健康、経済などあらゆる場面において「将来にわたって機能を失わずに続けていくことができることであり、そのため必要なシステムやプロセス」を指す。国連行動計画であるSDGs(Sustainable Development Goals)²⁾の基本概念ともなっている。持続可能性を測る指標として現在は、環境負荷、貧困格差、ジェンダーバランス、健康度、生産性などが提示されている。レジリエンス(強い復旧力)などもある。

さらに昨今の国際情勢の種々の変動に伴い、個々の国が食料だけでなく、一定以上の資源・エネルギーの自給率もしくは備蓄率を保持する努力を怠らないことも強く認識されはじめている。例えば、世界的に高品位鉱石の枯渇、スクラップ発生量の増加など資源面の課題、製造から使用の全段階での資源効率の抜本的向上とエネルギー原単位の削減の課題もこれらの自給率と密接な関係がある。製品などの使用中の破損、損耗を最小限に抑えることは自給率向上にも寄与する。

このように考えると、「作る」側と「使う」側の意思疎通、情報共有が希薄では、信頼性向上に向けた力強い転換は起きないのは明らかである。社会的に大きな前提条件として、「作る」側と「使う」側の「分断」を無くし、社会全体での情報共有と共通理解を拡大していくことができれば、信頼性向上技術の継続的な発展も確実に展望できるだろう。

参考・引用文献

- 1) ディペンダビリティ(総合信頼性)用語, JIS Z 8115: 2019, https://webdesk.jsa.or.jp/preview/pre_jis_z_08115_000_000_2019_j_ed10_ch.pdf (2022年10月31日閲覧)
- 2) 外務省、SDGsとは? <https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/about/index.html> (2022年10月31日閲覧)

2 | 構造・材料の破損、損耗

2.1 災害・事故による甚大な損害

われわれの行動と生活の空間の安全を脅かし、構造・材料の信頼性を損ねる破損や損耗の原因は多々ある（図表 2.01）。

阪神淡路大震災（1995 年 1 月 17 日）の被害は、死傷者 50 227 人、住家損壊 512 882 棟、火災焼損床面積 834 663 m² となった。東日本大震災（2011 年 3 月 11 日）の被害は、死者 15 467 名、行方不明者 7 482 名、負傷者 5 388 名、建物の全壊 10 481 戸、半壊 96 621 戸、一部損壊 371 258 戸など未曾有だった。地震動では加速度が反転振動する。また、加速度による力は質量に比例する。観察された最大加速度は、阪神淡路大震災で 891 ガル、東日本大震災では 2 933 ガルである。最大、自重の 3 倍程度の力がかかったことになる。

風圧は風速と共に急に増加する。10 m 四方の平面に垂直に当たると、風速毎秒 10 m では 0.63 トン、毎秒 20 m では 2.5 トン、毎秒 30 m では 5.6 トン、毎秒 50 m では 15.6 トンの風力がかかる。橋梁、ロープウェー等では風振動も大きい。

自動車による交通事故死傷者数は減少傾向だが、それでも年間 36 万人以上（2021 年）の犠牲者がある。衝突時の構造変形が、運転者、乗客等の身の安全を脅かしはけない。

船舶同士の衝突事故も危険度が高い。船舶では脆性破壊が発生し、大音響と共に折損し、沈没した事故例もある。

航空機では離発着毎に機体壁に大きな圧力差が生じ、繰返し変形がかかる。また、橋梁の上を大型トラック等が頻繁に通行するが、その度にある部位には繰返し荷重がかかる。船舶でも波による繰返し変形、荷重を考慮する必要がある。繰返し変形で 10⁴ 回、繰返し荷重で 10⁶ 回程度以上になると、外形が維持されたままです突然起こる疲労破壊が問題となってくる。

この表には載せないが、鉄道のレールや乗り物のブレーキなどでは磨耗が原因で事故になることもある。機械部品などの硬い材質部が使用と共に磨り減って損耗する摩耗は大きな問題である。

鉄鋼の用途拡大によって未体験の事故に遭遇することもある。1930 年前後、シベリア鉄道やカナダ鉄道で、鍛鉄製の車軸破損が頻発し、事故分析の結果、冬季（寒冷期）に集中して現れることが明白になった。1920 年以降では、石油液化ガスの利用が急速に高まって、石油タンク、圧力容器などの破損が起きるようになった。1944 年の圧力容器（液化天然ガス貯槽、-162 ℃）の破損事故では、128 人の死者と 680 万ドルの被害をもたらしたという。発電、化学プラントなどでの高温、高圧への挑戦も、高温クリープという高温特有の変形現象の洗礼を受ける。

また、経年劣化の被害も大きい。例えば金属材料の腐食によるコストは年間国内総生産（GDP）の 1 % にも及ぶという専門家の見積りもある。直接の災害や事故に結びつかなくても対策コストは膨大である。

腐食とともに金属中に侵入する水素が思わぬ破壊をもたらすことがある。特に材料強度の高いボルトなど

図表 2.01 様々な破損、損耗原因（筆者作成）

種類		原因	説明
破損	外力による 変形・破壊	自重	座屈、自壊を招く過荷重
		地震	重力加速度を超える振動する体積力
		強風	高い風圧と揺れ
		衝突	高速時の高い運動エネルギー
		疲労	繰返し変形、荷重
	環境起因の 変形・破壊	高温クリープ	高温での強度低下
		低温脆性	低温で生じる脆さ
		遅れ破壊	浸入した水素に起因する脆さ
損耗	使用中の 部分損失	腐食	酸化による表面損失
		摩耗	摩擦による表面損失

では、設置後数年経って突然破断するという「遅れ破壊」と呼ばれる現象が生じることがある。

いずれにせよ 100 % の安全・安心はあり得ない。直接の人的被害以外にも災害や事故によって交通遮断、断水、停電、ガス供給停止、電話不通などによる生活と経済への影響が大きく経済的損失も大きい。災害、事故に対する防護をより万全にし、貴重な生命と財産の犠牲を最小限化するために、信頼性向上技術の不断の研究と技術開発が求められる。

2.2 溶接構造物の国内外での破損事例

製品、構造物の構成要素である素材は均質が前提である。だが素材単独で使われることはまずない。部品成形、塗装、組合せ接合・溶接などの加工が施される。溶接継手（複数の素材を溶接した総体をいう）は、たとえ同じ素材を繋げたものでも図表 2.02 に示すように複雑で不均質な内部構造を持つ。き裂の発生場所、伝播経路には様々な可能性がある。溶接金属、熱影響部、母材などの個々の性質が分かっていたとしても溶接継手の性質予測は難しい。溶接構造の主たる素材は鉄鋼である。溶接構造物の安全性は、鉄鋼の信頼性向上技術が抱える複雑さを物語る典型例である。

溶接学会、日本溶接協会は以下のように日本の溶接技術史を掲載し続けている。

◆ 佐々木新太郎による「日本溶接技術発達史」¹⁾ -²⁵⁾ (1904 年～1945 年)

◆ 谷垣尚による「日本の溶接技術の発達と将来」²⁶⁾ (1945 年～1985 年)

◆ 日本溶接協会による「50 年史」²⁷⁾「60 年史」²⁸⁾「70 年史」²⁹⁾ (1946 年以降)

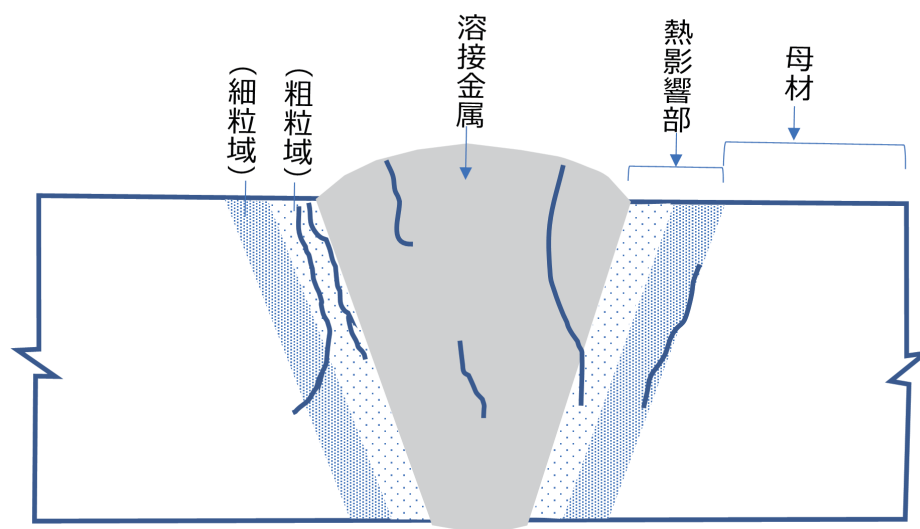
本稿では溶接技術^{A)}の具体に立ち入らず、学協会誌掲載記事を参考に溶接構造物の破損事例を概観する。

■ 1931 年 全溶接軍艦の沈没事故

軽量巡洋艦が演習中に船体の折半破壊で沈没する事故が発生し、1931 年以降全溶接の軍艦製造は中止された。

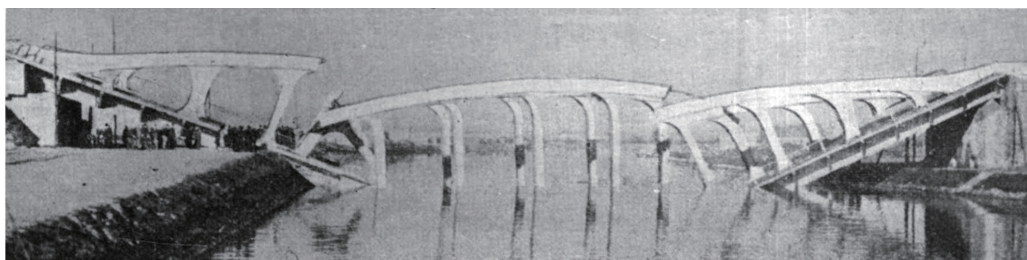
■ 1938 年 3 月 14 日 Vierendeel トラス橋の崩落

1933 年以降、ベルギーのルーバン大学、A. Vierendeel 教授が企画・設計したトラス橋が、50 橋以上ベルギー各地に架設された。長さ約 74.5 m、幅約 10.4 m の Hasselt 橋は、その一例。1937 年 1 月 19 日に載荷試験に合格したが、1938 年 3 月 14 日に路面電車通過直後に崩落した（図表 2.03）。幸い死者はなかった。他の同型のトラス橋も数年間の内にほとんど破損したらしい。Hasselt 橋には、最大板厚 55 mm のトーマス鋼（引張強さ：412~510 MPa、降伏強さ：274 MPa 程度、伸び：20 % 以上）が使用されて、現場工作も含めすべて溶接によって組立



図表 2.02 溶接継手は複雑系：き裂の様々なでき方
(筆者作成)

A) 国立科学博物館の系統化調査では、三田常夫『アーク溶接技術発展の系統化調査』（2016 年 3 月）がある。

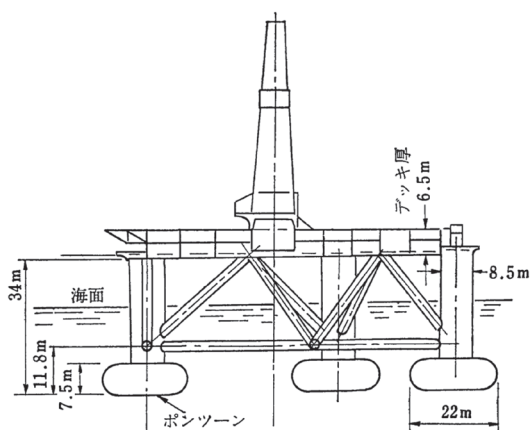


図表 2.03 1938 年 3 月 14 日 Vierendeel トラス橋の崩落
(文献 30 の第 1 図を転載：溶接学会提供)

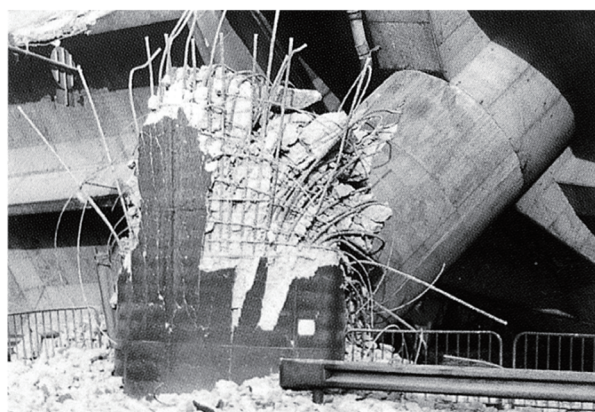
てられていた。当時の溶接機ではアークは不安定であり、鋼材は不純物が多く炭素当量も高く、溶接継手には多くの欠陥が発生したと思われる。

- 1943 年 米国 戦時標準船の船体破壊
1941 年～1948 年に全溶接で同一図面に基づき大量建造された船舶のリバティ型貨物船 2 580 隻の内 114 隻、T-2 型油槽船 530 隻の内 26 隻が重大な破損事故を起こした。1943 年冬、ボストン湾に係留中の T-2 型油槽船の一隻が理由もなく夜間に突然船体が二分し沈没した例が象徴的な事故例である。
米国は、鋳構造への後戻りではなく、より積極的に溶接構造採用のための施策として溶接用鋼材の低温脆性に対応する基礎研究の推進や溶接工法での溶接継手位置の設定法など今日溶接施工の常識となっている数多くの事項を規定化し世界的な影響を与えた。これが破壊力学を生み出すきっかけともなった。
- 1968 年 山口県と千葉県での球形貯槽タンクが水圧試験時に破損した。

- 1968 年、1969 年
台風下で、大型鉱石運搬船が船体破壊によって沈没した。
- 1974 年 陸上貯蔵タンクから重油が流出した。
- 1975 年 原子力発電装置で配管の減肉、応力腐食割れなどが発生した。
- 1980 年 Alexander L. Kielland 号破損
1980 年 3 月 27 日午後 6 時 30 分頃、北海で発生したペンタゴン (5 本脚) 型半潜水型石油掘削リグ Alexander L. Kielland 号 (図表 2.04) の破損・転覆事故は、水平支えパイプの水中聴音器サポートフランジ管取り付け溶接部の欠陥から発生した疲労き裂が原因だった。このリグはホテルでもあったので滞在者 212 名中 123 名が死亡するという大惨事になった。
1976 年にフランスの造船所で建造された。水平支えパイプに加工された丸穴に、外径 25 mm、板厚 20 mm、長さ 228 mm の水中聴音器サポートフランジ管を差し込み、隅肉溶接してあったが、この隅肉溶接のサポートフランジ管側熱影響部に溶接中あるいは溶接後まもなくき裂が発生



図表 2.04 浮体構造 Alexander L. Kielland 号
(文献 31 の図 1 を転載：日本高圧力技術協会提供)



図表 2.05 阪神・淡路大震災で切断された鉄筋
(文献 32 の図 3 を転載：溶接学会提供)

しそのき裂から成長した疲労き裂が原因だった。起点になっていたき裂の中に塗料が検出されたので70 mmもの長いき裂が建造時に発生していたと断定された。

■ 1995年1月17日 阪神・淡路大震災

従来、上下方向の柱・鉄筋などへの大きな引張荷重の負荷は予想されていなかった。倒壊した高速道路の橋脚（図表2.05）では圧接部で切断された上下方向の鉄筋が曲がっていないので、大地震のごく初期の上下方向に大きな引張荷重によって、圧接部で切断された可能性が高い。圧接部での溶接不具合が疑われる。

このように溶接構造物の事故例の一部を見ても、技術の新しい展開や不測の自然災害などに伴い「必然的」に発生する歴史を繰返しているとも見える。その都度、原因の究明と再発防止策を徹底することが大事になる。

2.3 溶接構造物の脆性破壊データベース

破壊の出現を予め知ることにはできないが、細心の注意を払うと、き裂の発生検出、成長追従などの対応はできる。そのためにも、実際の事故事例の知識の共有が極めて有効である。この観点からまとめられたいくつかの事故事例の公開データベースがある。それらの内、鉄鋼の脆性破壊と関係が深いものをいくつかここで紹介する。

(1) 国土交通省 海難審判所のホームページ³³⁾

明治時代からの重大海難事故と審判結果がまとめられている。

(2) 失敗学会 失敗知識データベース³⁴⁾

科学技術振興機構（JST）が、2005年3月に公開した「失敗経験から獲得された新たな知識・データ等を構造化したデータベースの構築」を承継したもの。

キーワード検索で「脆性破壊」と入力すると、20近い事例が現れる。

(3) 小林英男編「破壊事故—失敗知識の活用」³⁵⁾

（社）日本高圧力技術協会が分担し、(2)のデータベースに収録した材料分野における破損事故の代表的な事例に基づき、失敗知識の活用の仕方を学べるようにまとめた。

2章のまとめ

ここでは鉄鋼の溶接構造に焦点を当て、失敗・事故史を概観した。新しい挑戦は新しい可能性を実現すると同時に、予期せぬ事故をもたらすと認めなくてはならない。100%の安全・安心はあり得ない。失敗・事故の経験に学びその再発を防止すると共に、原因の解明と技術の弱点克服を通して、信頼性を高めていくしかない。

参考・引用文献

- 1) 佐々木新太郎, 溶接技術発達史 (I), 溶接學會誌, 7, (1948), 24-27
- 2) 同上, 同上 (II), 同上, 17, (1948), 66-71
- 3) 同上, 同上 [III], 同上, 17, (1948), 104-109
- 4) 同上, 同上 [IV], 同上, 17, (1948), 150-155
- 5) 同上, 同上 [V], 同上, 17, (1948), 189-194
- 6) 同上, 同上 [VI], 同上, 17, (1948), 226-227
- 7) 同上, 同上 [VII], 同上, 17, (1948), 262-263
- 8) 同上, 同上 [VIII], 同上, 17, (1948), 292-293
- 9) 同上, 同上 [IX], 同上, 17, (1948), 328-329
- 10) 同上, 同上 [X], 同上, 17, (1948), 365-366
- 11) 同上, 同上 [XI], 同上, 18, (1949), 20-21
- 12) 同上, 同上 [XII], 同上, 18, (1949), 51-53
- 13) 同上, 同上 [XIII], 同上, 18, (1949), 89-90
- 14) 同上, 同上 [XIV], 同上, 18, (1949), 131-135
- 15) 同上, 同上 [XV], 同上, 18, (1949), 166-168
- 16) 同上, 同上 [XVI], 同上, 18, (1949), 195-196
- 17) 同上, 同上 [XVII], 同上, 19, (1950), 30-32
- 18) 同上, 同上 [XVIII], 同上, 19, (1950), 116-119
- 19) 同上, 同上 [XIX], 同上, 19, (1950), 156-158
- 20) 同上, 同上 [XX], 同上, 19, (1950), 191-194
- 21) 同上, 同上 [XXI], 同上, 19, (1950), 224-226
- 22) 同上, 同上 [XXII], 同上, 20, (1951), 31-39
- 23) 同上, 同上 [XXIII], 同上, 20, (1951), 74-77
- 24) 同上, 同上 [XXIV], 同上, 20, (1951), 127-131
- 25) 同上, 同上 [XXV], 同上, 20, (1951), 173-174
- 26) 谷垣尚, 日本の溶接技術の発達と将来, 溶接学会誌, 55, (1986), 193-195
- 27) 日本溶接協会, 日本溶接協会50年史, 1999.11, http://www-it.jwes.or.jp/jwes_50th/jwes_50th.jsp, (2022年10月31日閲覧)
- 28) 日本溶接協会, 日本溶接協会60年史, 2009.11, http://www-it.jwes.or.jp/jwes_60th/jwes_60th.jsp, (2022年10月31日閲覧)

- 29) 日本溶接協会, 日本溶接協会 70 年史, 2019.11, http://www-it.jwes.or.jp/jwes_70th/jwes_70th.jsp, (2022 年 10 月 31 日閲覧)
- 30) 南文次郎 (訳), 白耳義における全熔接橋の破壊, 溶接協會誌, 8, 7, (1938), 341-342: 溶接学会提供
- 31) 篠原博, 北海油田海洋構造物 Alexander L. Kieland の転倒事故について, 圧力技術 19, 5, (1981), 275-276: 日本高圧力技術協会提供
- 32) 矢島浩, 破損例の教訓と基礎技術の大切さ, 溶接学会誌, 81, 3, (2012), 151-153: 溶接学会提供
- 33) 国土交通省海難審判所, 日本の重大海難, <https://www.mlit.go.jp/jmat/monoshiri/judai/judai.htm>, (2022 年 10 月 31 日閲覧)
- 34) 特別非営利活動法人失敗学会, 失敗知識データベース, <http://www.shippai.org/fkd/index.php>, (2022 年 10 月 31 日閲覧)
- 35) 小林英男編, 破壊事故－失敗知識の活用, 共立出版, 東京, (2007)

3 | 安価で加工しやすい鉄鋼

もし鉄鋼が「貴金属」のように希少だったなら構造・材料の信頼性に大きく関わらなかっただろう。鉄の資源の賦与性、素材としての利便性がいったん解き放たれると、大きな社会的役割を担い、同時に信頼性を厳しく問われる材料となった。そういう時代が19世紀に巡ってきた。

3.1 科学・技術と産業・社会が初めて結びついた時代(1800年～1830年)

信頼性向上に関する技術と科学・学問の生まれと発展を大きな視野で見つめるのに役立つ貴重な大著が二つある。いずれも戦後まもなく英語で刊行されて、世界に大きな影響を与えた。これらが本稿でのテーマである鉄鋼の信頼性向上、特に疲労、高温クリープ、腐食などの経年劣化についてすべての事例をとりまとめているとは言えないが、主だったところを余さず述べている。二つの大著が特に有益な点は、歴史的に記述していることと関連分野との関係を意識して記述していることにある。したがって、個別分野の専門書では得られない総合的、鳥瞰的、歴史的視点を学ぶのに役立つので、採り上げておきたい。

「二つの大著」

「材料力学史 (History of Strength of Materials)、1953年、和訳 1974年、川口昌弘、鹿島研究所出版会」¹⁾

この分野の世界的権威である S.P. ティモシェンコ (Stephen P. Timoshenko, 1878 年～1972 年、キエウ生まれ、1927 年米国籍) が、米国での 25 年にわたる講義をまとめたものである。序文で「たとえば、鉄道輸送の発達と構造材としての鋼の利用により、構造工学の新しい問題が数多く登場し、材料力学の発展に大きな影響をもたらしたことは疑う余地はない。(中略) 材料力学の発展は、弾性論や構造力学などの関連する分野の発展を考えずに論ずることはできない」として、材料力学の発展の主要なステップを実用現場での問題解決と結びつけて記述している。材料力学も他の工学と同じように、現実・現場問題を対象にし、関連する諸科学を動員し、問題解決に挑むものであるという主張が全編ににじみ出ている。

「歴史における科学 (Science in History)、1954 年、和訳 1966 年、鎮目恭夫、みすず書房」²⁾

J. D. バナール (J. D. Bernal, 1901 年～1971 年、アイルランド生まれ) は、「生命の起源」の著者としても有名な科学者 (実は結晶学がバックグラウンド) である。この書籍は、「社会史の中での科学」講演から生まれた。「社会」と「科学」の密接な関係に目を向けている。第一版序文で「科学者は過去においては自分たちのすぐ前の人々の業績以外の一切のものを無視することができたし、過去の伝統は進歩を助けるよりはむしろ進歩を妨げがちなものだとしりぞけることさえできた。(中略) われわれが直面しているいろいろな困難を克服し、科学の新しい諸力を破壊にではなく福祉のために解放する道を見出すためには、今日の事態がどのようにしてもたらされたかを新しいやり方でしらべることが必要である」と第二次世界大戦後の時代状況を強く反映しながら、科学が社会に制約を受ける面だけでなく、科学が社会に与える影響を分析する面の、すなわち「科学と社会との交互関係」を完全に再吟味することに挑んだ書籍である。

ティモシェンコはどちらかというと技術もしくは工学に軸足を置き、バナールはどちらかというと基礎科学に軸足を置いている。筆者は両方の視点を持つべきと考えるので、本稿 (4 章の文脈も二つの大著に倣った) では、西欧における展開について、ティモシェンコが辿った物語を中心に置き、バナールがそれをどう見ていたのかの追記と、適宜、他の文献などから補強して、簡潔に紡ぎ直した。

二人は「1800 年～1830 年」を一時代に画している。バナールによれば、この時期は人類の発達にとっての分かれ目であり、人間の自然に対する支配が人間の手を多様な機械に置き換えるだけでなく、人力・畜力・風力・水力を蒸気力に置き換えるという二重の置換によって決定的に転回した唯一の時期だったとしている。この準備は 16、17 世紀での、実験的定量的科学の誕生と資本主義的生産様式の誕生に始まり、それまで別の道を歩いていた科学と生産が出会い、「世界のあらゆる人々の生活を変革する運命にあった諸力を解き放った」としている。ヨーロッパ世界では「神は真実を聖書にはもちろん、自然界にも潜まされた。自然の法則を知るのは神に近づくことである」という考えが現れ、古代ギリシア以降に再び「ギリシア科学」が

復興し、技術への関心も高まる。

歩み方は国によって異なる。イギリスでは王制と封建制が17世紀に早くも一掃されていたが、フランスでの社会システムの転換はそれより遅れた。勢いイギリスが先行する。

産業革命は繊維産業に徐々に広がり、その後、加速度的に展開する。当時、燃料も構造材料も木材であり、生産規模の拡大には木材の欠乏が足かせとなった。そこで燃料に石炭、構造材料に鑄鉄を使う挑戦が始まった。これは木材資源の乏しかったイギリスにとっては好都合だった。イギリスの中でも労賃の安価な地方で工業化が速く進展する。繊維関係の事業の地域、規模の拡大に伴いそれらを結ぶ運輸を発達させる運河、鉄道が拡大した。動力機関と採鉱冶金技術の大展開への素地ができあがり、関連技術に携わる専門的な人材も生まれ育っていく。

新しい機械、技術が多大な富を産むという経済的利点が社会を突き動かした。その中で、科学者も技術者もその社会的地位を高めていく時代に入る。そして、「エンジニア」も生まれる。ヴィクトリア期（1837年～1901年）、あるスコットランド人技師が「エンジニアとは、社会進化の旗手であり、生涯、研究・創作していく専門職である」と言ったのがエンジニアの起源だとも言われる。

バナールは、この時期のエンジニアの英仏比較をしている。イギリスのエンジニアは腕が極めて良いが無学な職人が普通だった。フランスでは工場の役割が小さく、国家と軍隊の学校の役割が大きく、学校で養成されたエンジニアが優勢だったとしている。英仏とも最も活躍した人材は、最終的には理論と実践を結合し、産業技術の発展に多大な貢献をしているが、平均値で言えばこのような差があった。

実は、当時、両国の良い面を採り入れて、座学（理論）と実習（実践）を結合した教育を大学で行い、優秀なエンジニアを育成しようとした世界最初の試みが、

日本の工部大学校³⁾である。これはグラスゴーから招聘された弱冠26歳のヘンリー・ダイアー（Henry Dyer、1848年～1918年、スコットランド）によるところが大きい。ここで育成された数々のエンジニアが明治日本の工業技術分野の草分けになった。1871年に工部省工学寮として出発したが、1886年に帝国大学に合併されて「無くなった」。

3.2 安価で加工しやすい鉄鋼の大量生産（1855年）へ

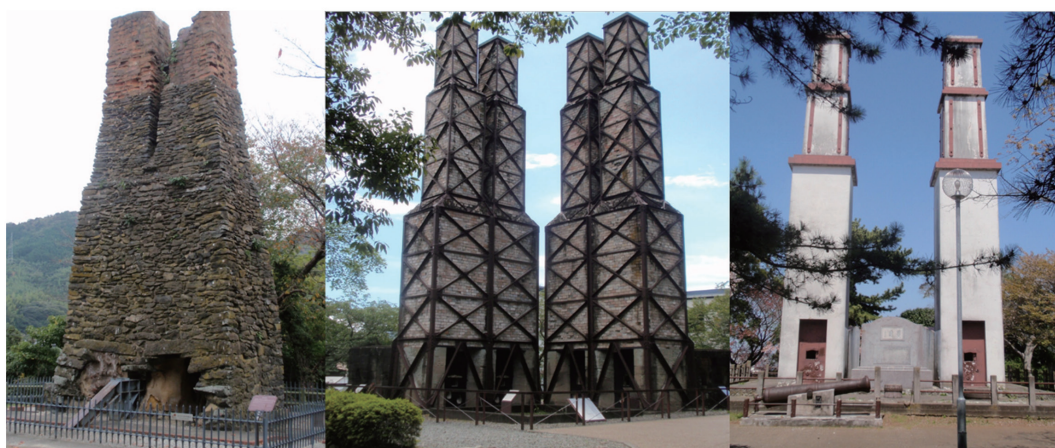
人類が最初に手にした鉄は隕鉄だろうと言われている。砂鉄と炭素（木炭）を合わせて高温においておくとスポンジ状の固体の塊（鋳、ケラ）と炉から溶け出したものが冷えて固化したガラス状のもの（ノロ）ができる。ノロは砂鉄が含んでいた微量元素（日本ではシリコン、チタンなど）の酸化物でもある。ノロは錆びないので出土すると製鉄遺跡の物的証拠ともなる。鋳は単純に均一な鉄とはならない。鉄も炭素含有量が様々で、炭素量の低いものから（海綿）鉄（てつ）、鋼（はがね）、銑（ずく、せん）と呼んで選別した（図表3.01）。

銑が一番低い温度で溶けるので、溶かして型に鋳込むのに好都合である。これが鑄鉄である。鑄鉄にはもろく壊れやすい弱点がある。大きなものも作れない。炭素を減らせば強靱になり鉄にも鋼になる。だが固体なので、炭素や酸化物などを除くには金床に熱した鉄材を乗せ鎚で叩く。これが日本刀作りの基本ともなっている。ただこの方法でも作れる製品の大きさには限界がある。

そこで古くから「溶かした鉄で、炭素の少ない、強靱な鉄を作る方法」が求められてきた。1840年頃、炭素を取り除く操作を大規模に行うのに適した新しい炉が発明された。これは高温の燃焼ガスを煉瓦の天井に当てて、その輻射熱を利用し燃焼ガス中に含ま

図表 3.01 砂鉄や鉄鉱石を還元してできる鉄は温度によって性質が違う（筆者作成）

炭素量	融点	得られる状態	名称	備考
< 2.14 %	1 150 ℃～ 1 500 ℃	固体 スポンジ状	海綿鉄 鋼	加工でしか変形できない
6.67 % 辺り	1 150 ℃	液体 全溶融金属	銑	型に鋳込むことができる



萩

葦山

那珂(水戸)

図表 3.02 江戸時代に各藩で築造された反射炉。他に佐賀、集成館(薩摩)などもある(筆者撮影)

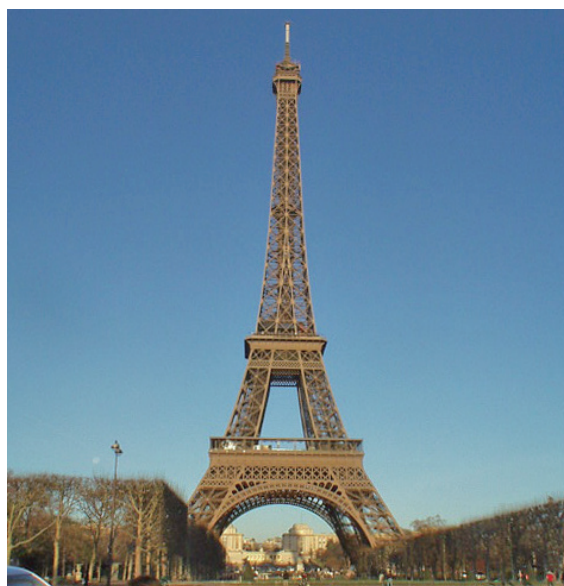
れる酸素で炭素を燃焼して除去する方式だったので反射炉(図表 3.02)と呼ばれた。溶鉄から炭素が抜けるに連れて融点は上昇し粘度が高くなる。銑鉄の融点は 1 150℃ 辺りであるが炭素をほとんど含まない鉄の融点は 1 500℃ 以上に達する。反射炉の側面から差し込んだ鉄の棒で粘度の高い半溶融の鉄を丹念にかき回して鉄の棒に絡みつけて取り出したものを錬鉄(英語では wrought iron)と呼び、この方法をパドル法と呼んだ。

加工が容易な錬鉄は広く用いられた。炉から一回に取り出す錬鉄の塊は人力で扱える程度の大きさだが、赤熱しているうちに小さな塊を大きくまとめ、蒸気動

力のローラーで圧延して軍艦の部材や鉄橋・鉄骨、鉄道レールなどが作られた。1889 年完成のパリ・エッフェル塔(図表 3.03)は錬鉄による代表的な建造物である。

一方、炭素が多いと低い温度で溶けた鉄(銑鉄)ができる原理を利用している高炉法^{B)}は、14、15 世紀頃ドイツのライン河流域で水車による送風技術を使い発達したものとされている。

1855 年、イギリスのヘンリー・ベッセマー(Henry Bessemer、1813 年～1898 年、イングランド)が空気を大量に吹き込むことができる「底吹き転炉」を発明し、鉄鋼の大量生産を導いた(図表 3.04)。錬鉄は



図表 3.03

錬鉄で建造されたパリ・エッフェル塔(筆者撮影)

B) 現代製鉄技術の主幹である高炉技術の日本での発達史は、彼島秀雄、高炉技術の系統化、国立科学博物館技術の系統化調査報告、Vol.15 2010 年 3 月に詳しい。

非効率な上に鉄鋼より強靱さで劣っていたため、錬鉄の時代は終わりを迎えた。この転炉法^{C)}の出現をもって「鋼の時代」の始まりとすることが多い。但し、ベッセマーの当初のやり方は必ずしも満足できるものではなくさらなる改良が必要だった。

ベッセマーの成功は反射炉の改良を促した。ジメンスが熱い排ガスで吹き込む空気を予熱し炉の温度を高めることに成功した（平炉と呼ばれた）。反射炉は平炉として息を吹き返した。

1879年、シドニー・G・トーマス（Sidney Gilchrist Thomas、1850年～1885年、イングランド）は炉壁内張りレンガを塩基性に換えて、リンを吸収できるように改良した（図表 3.05）。それまでの転炉、平炉ではリン除去ができず、低リン含有の産地がスウェーデン、スペイン、北米スベリオル湖などに限定され、採鉱量も少ない鉱石に頼っていた。含リン鉱石が使えると鉱石産地が広がり採鉱可能量も増える。その結果、ロレーヌ、アルザスでの製鉄が盛んになっていく。こ

こに至って鉄鋼を安く大量に使える技術が確立したと言える。

ベッセマーから一世紀経って、1952年オーストリアのリンツ Linz、1953年ドナウウィッツ Donawitz の両工場で工業化された LD 転炉によって、製錬時間わずか約 30 分で低リン、低酸素の良質鋼が得られるようになった。純酸素上吹転炉（図表 3.06）ともいう。炉の上部から水冷パイプで、高圧の酸素を炉内の溶銑中に吹き込む。生産性が高く従来の平炉、底吹転炉に代わって製鋼炉の主体となった。大型のもので容量は 200 トン～300 トンだった。なお、戦後日本の製鉄業が大きく発展できたのは、この技術を導入し成長・発展させたことによるところが大きいと言われている。日本が入手できる鉄鉱石原料の不純物組成に適した方法であり、高度の精錬（不純物除去）にも適していたのが技術優位点となる。



図表 3.04 イギリス、シェフィールド、Kelham Island Museum 展示のベッセマー転炉実機（筆者撮影）



図表 3.05 川崎市民ミュージアム展示のトーマス転炉実機（文献 4 から転載）
NKK による寄贈：1937 年導入の実機⁵⁾



図表 3.06 オーストリア、ウィーン、産業技術博物館展示の実用 1 号 LD 転炉（筆者撮影）



C) ベッセマーは「銑鉄を鋼に変える」という意味で converter と呼んだ。その和訳の「転換炉」が「転炉」となった。ところが、目に入る回転機能から「回転炉」と誤解することがある。

3章のまとめ

科学・技術が社会発展の推進力となる時代になったが、腕の良いエンジニアか、頭でっかちのエンジニアかを巡る議論が、ティモシェンコとバナーン以降、世界の地下水脈を流れ続けている。科学と技術の交流がなければ「科学」と「社会」は結び付くはずもないので、このテーマはこれからも大きなテーマとなる。

鉄鋼生産とその利用は、手工業を大型機械工業に一変した。利用技術も長足の進歩を遂げたが、鉄鋼に関する科学研究も同時に発達した。この流れは現代でも尽きることがなく続いている。

加工しにくい鉄に対して加工しやすい鋼を大量生産できるようになったことがこの大きな歴史的転換を引き起こし、誤解を恐れず言えば、破損や損耗という単純には原因を解明しにくい病も持ち込んだようにも思える。

参考・引用文献

- 1) S. P. ティモシェンコ, 材料力学史 (History of Strength of Materials, 1953), 川口昌弘訳, 鹿島研究所出版会, 東京, (1974)
- 2) J. D. バナーン, 歴史における科学 (Science in History, 1954), 鎮目恭夫訳, みすず書房, 東京, (1966)
- 3) 長井寿, 工学の第3の波を期して—ヘンリー・ダイアーの日本への思いを読む, ふえらむ, 15, (2010), 616-622
- 4) Thomas converter : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thomas_converter.jpg (2022 年 11 月 9 日閲覧) から転載
- 5) 川崎市民ミュージアム : <https://www.city.kawasaki.jp/miryoku/category/67-1-4-1-1-16-0-0-0-0.html> (2022 年 11 月 4 日閲覧)

※ 2019 年 東日本台風の被害のため、休館・閉鎖中

最初の「科学技術基本計画」を書いたベーコン

Francis Bacon, The Advancement of Learning, (1603)

服部英次郎、多田英次訳、学問の進歩、岩波文庫、(1974年)

ベーコンは、イングランド王国の高官の家系に生まれ、国王に重用された。エリザベス一世は1603年3月に亡くなり、1603年7月にジェームズ一世が継いだ。ジェームズ一世への献書の形で著された本書は二巻からなり、第一巻は学問の大切さと価値を述べており、第二巻は考慮すべきあらゆる学問分野において検討すべき諸課題をリストアップしている。今の日本で言えば「科学技術基本計画」と対比できる戦略書である。正式な学問書はラテン語で書かれるのが習わしだった時代に、本書は史上初の英語で書かれた哲学書と言われる。

イングランド王国がネーデルランド王国と一緒にスペイン王国と争った戦争は、海戦での英側の勝利はあったが最後は両者が疲弊して和睦(1604年)となった。ベーコンは、西欧の繁栄が、印刷術(学問)、火薬(戦争)、羅針盤(航海)の三つの技術によることを見抜き、それまでの西欧の学問がこれらを生みだすことに全く貢献しなかったばかりか、また生活の便益向上には全く役立っていないことを強く嘆いた。この考えを、1605年「学問の大いなる革新」、1620年「Novum Organum」へと展開していく。ベーコンは、将来の大英帝国の繁栄を準備する「哲学」の一翼を担ったのではないか。

ベーコンの哲学は、以下の基本認識から入るべきと筆者は考える。(カッコ内は筆者による解釈)

「人間は神の言葉を記した書物(聖書)、あるいは神の御業を記した書物(自然)の研究の双方において無限の進歩と上達を遂げるように努めるべきである」(=自然を理解することは神に近づく道の一つ)

「神は、その力を目に見えるところの質料を作られたところで発揮され、その知恵は形相の美を人間が整えられるように示唆されたところにある」(=自然は創造したが、その解釈は人間に任せた)

「今までの学者たちの欠点は、自分自身の幸福や安全よりも、祖国や主人の保護と利益と名誉を重んじている点にある」(=学者は神の真意を知らず、王に仕えることで自己保身しているだけだ)

「学問は、文民としてのとりえである道徳上の美点に、平和と平和な統治との技術や気性に感化を及ぼすだけでなく、戦争と軍事上の徳性と武勇を備えた人間をつくる」(=学問は学者だけのものではない)

このように人民と国家のために、高邁な精神だけでなく、具体的な便益をもたらすように学問を究めることを強く説いた。特に、技術の効用を以下のように述べている。

「技術の歴史の効用は、すべての歴史の裏で、自然哲学のために最も根本的で基本的なものである。自然哲学と言っても、細かく区別立てしたり、崇高に過ぎたり、あるいは勝手な空論に終わる自然哲学でなくて、人間の生活の幸福と利益とに貢献するような自然哲学である。」

「西欧の立派な学院では、すべて専門科目(神学、法学、医学)に専念して、教養科目(哲学と一般原理の研究)をやる余裕のあるものがひとつもない」

「(学問の)すべての事業は、十分な報酬(努力を倍加する)、堅実な指導(誤りを防ぐ)と協働的な作業(微力を補う)によって成就できる。指導がけだし大事。」

「学問の場所には、建物の建設、定時収入のある基金の寄与、特免権と特権の賦与、管理のための制度と規定(が必要)」

などなど、技術の正しい理解と利用のための姿勢から具体的な政策論まで展開していくが、現代の日本が傾聴すべき論点もどんどん出てくる。

この考えが、観察や実験などを繰返し行うことによって、経験を少しずつ積み、結果的に真理に到達するという、「経験論」、「帰納法」に昇華していく。筆者はそのような哲学上の分類では隠れてしまうベーコンの思い=人間の具体的な幸福を考え、それに学者は寄与すべき、に心を打たれるので、あえてそのような整理学を避け、「演繹法」と言われるフランスのデカルトと対比してみた。真理接近を目的とするのか、手段とするのか、どの生き方もあってよいと思う。ベーコンはあくまでも手段だと言っているように聞こえ、科学だけでなく技術の重要性も指摘したことは歴史的には新鮮だった。

デカルト「方法序説」（1637年）の本音は？

小場瀬卓三訳、方法序説、角川文庫、（1968年改訳）

デカルトは、結局不本意ながらも教会によって無神論者の烙印をおされてしまった。「方法序説」は、「屈折光学」「気象学」「幾何学」をまとめた書物の序であり、正確な題名は「理性を正しく導き、もろもろの科学における真理を探究するための方法序説」と書かれており、1637年にフランス語（ラテン語でない）で上梓された。本当は「宇宙論」（光の本性、光の生じる太陽と恒星、光を伝達する天空、それを反射する遊星・彗星および地球、地球上にあるすべての物体—そのあるものは色彩を持ち、あるものは透明で、あるものは光を発する—最後に光の観察者である人間を論じる）をまとめ、印刷に回そうとするとときにガリレオの断罪を知り法敵とされるのを恐れ出版を断念したが、それでも残すべきは残すと決断してこの書物を出した。

冒頭の一文「良識はこの世で最も公平に配分されているものである」が、史上初の「理性の人間宣言」とも後世言われるようになるもので、筆者はこの文がこの本で最も大事と思う。

この「序」は6部構成だが5、6部は前後の事情の「言い訳」で、4部は誰もが知る「われ思うゆえにわれあり」を述べている箇所である。デカルトは、神を完全なる存在とし、神はその靈魂を理性的生物である人間に宿し、人間は靈魂とは独立の存在である肉体も持つとする。人間は不完全であるので、完全なる神の教えを知ろうとする理性が、靈魂の力で働く。理性が働くことによって、自分が存在することを自覚できるので、だから理性を使え、とデカルトが述べているように筆者は読んだ。

そんなことより、序説の本題は、1、2、3部にある。デカルトは、法学士として出発し、諸国を旅し様々な人士と議論をかわし、真理に近づく道を探究した。彼が自覚したことは自分も世間も不完全であるということである。ソクラテスに通じる面がある。その結果、徹底した実験に基づく科学者として諸国に知られるようになった。文→理転したわけだ。

自ら絞り込んだ、三つの道徳律、1：法及び習慣に従う、2：一貫性を堅持する、3：自己の確立／変革に徹する、に基づき進め、「わたくしはこの世に自分以上に、楽しい、邪念のない満足を味わうことのできる人は誰もいないだろうと信じ」、科学研究に没頭しつつも、他者との交流もできるようになったと記している。

「方法序説」全体はデカルトの持つ色濃い苦悩と矛盾を含んでおり、現代に至るもその解釈が様々に広がる問題書である。

筆者は、デカルトが自ら行った、正確な実験結果に立脚し、他のものを無批判に受け売りせずに、論理的方法で自他の真偽を検証する科学的態度、に多くを学んできた。デカルトは「違った意見が存在するということは、違った角度から同じ事を見ている結果であることが多い」とも述べている。「方法序説」の1、2、3部はこのように現代の科学者・技術者にも、自らの根本姿勢がどうあるべきかを深く考えさせてくれる。

4 | より高強度の壁は信頼性向上

安全を脅かす自然災害や事故などの脅威からヒト、モノを守ることが材料に期待される。鉄鋼はその代表例となっているが、最初から約束されたものではない。多くの紆余曲折を伴う。

4.1 より強く、より軽く

グローバル化が進んでも材料選択における地域性は無視できない。西洋は石文化、東洋は木文化というが、ここには材料調達と材料選択の地域性が密接に絡んでいる。日本では古くから建築物は下部構造骨格には石を、上部構造骨格には木材を基本としている。これは木材が豊富に入手できるという調達容易性の面だけでなく、地震、高温・多湿対策の経験を通じた選択結果とも言える。強風対策が優先される地方では石が重量材として重要性を増す。

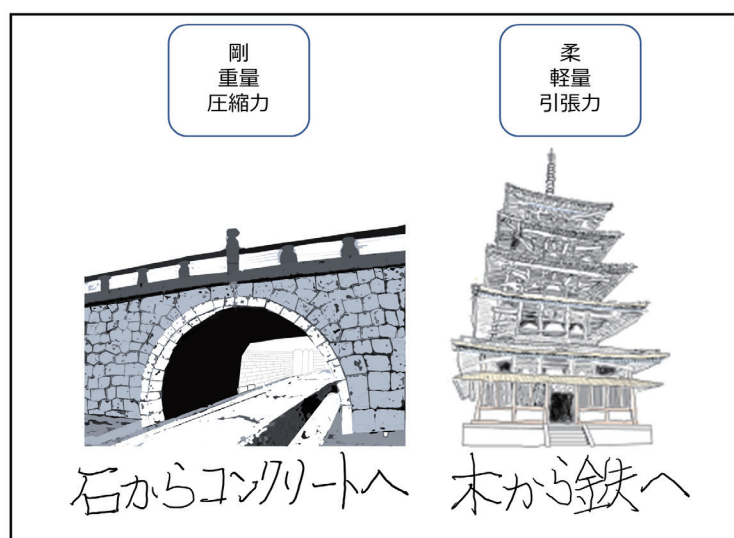
ところが天然資源にも限りがある。大量の材料が必要となり、近代工業で大量生産できるようになった結果、石の代わりにコンクリート、木の代わりに鉄鋼が

使われるようになった。概していえば、定置建造物用として、石・コンクリートに重量、圧縮力、剛性を期待し、木・鉄鋼に軽量、引張力、柔軟性を期待する。乗り物も木製から出発している。蒸気機関すら木製のケース・タンク・レールが出発点である。(図表 401)

定置建造物の大型化、高層化、乗り物の高速化など、利用者の要求の高まりにつれて、より強い材料、より軽い材料と期待はさらに高まっていくだろう。これが、コンクリート、鉄鋼などの一層の材料強度上昇を促すと共に、カーボン材料など全く新しい材料への期待の高まりももたらす。

建築物をより高くするためには自重自体が敵となる。自重で潰れたり、座屈したりしないようにするためには材料の強度を増すしかない。

大質量ほど地震力は大きくなるので、大地震多発のところでは上部構造の軽量化が不可欠である。高層化や軽量化は材料の高強度利用なしに達成できない。乗り物も利用者の安全性と燃費向上を両立させるためには、高強度利用と軽量化の組合せが不可欠である。



イギリス、ヨーク、鉄道博物館にて



ドイツ、シュツットガルト、メルセデス博物館にて

図表 4.01 天然材料から人工材料へ（筆者作成、撮影）

4.2 カ学の発展と材料の進化

自潰や座屈は避けるべきものとして紀元前から認識されていた。レオナルド・ダ・ヴィンチ（Leonardo da Vinci, 1452 年～1519 年、イタリア）が「いろいろな長さの鉄線の強度試験」をしたノートが残っている。ガリレオ・ガリレイ（Galileo Galilei, 1564 年～1642 年、イタリア）が、錘による単純引張で材料の強さを測る実験によって、棒の強さが断面積に比例するが長さとは無関係なことを記している。ロバート・フック（Robert Hooke, 1635 年～1703 年、イングランド）は「ばねについて」という弾性の論文を発表し、錘の重さとばねの伸びが比例するという線形関係を明らかにした。だが、レオナルド・ダ・ヴィンチが描いたような様々な機械の設計図（＝人類の夢）を実働させるための材料、動力源が揃い、それらに関する科学が「役立つ」ようになるには 18 世紀～19 世紀の産業革命の時代を待たなくてはならない。

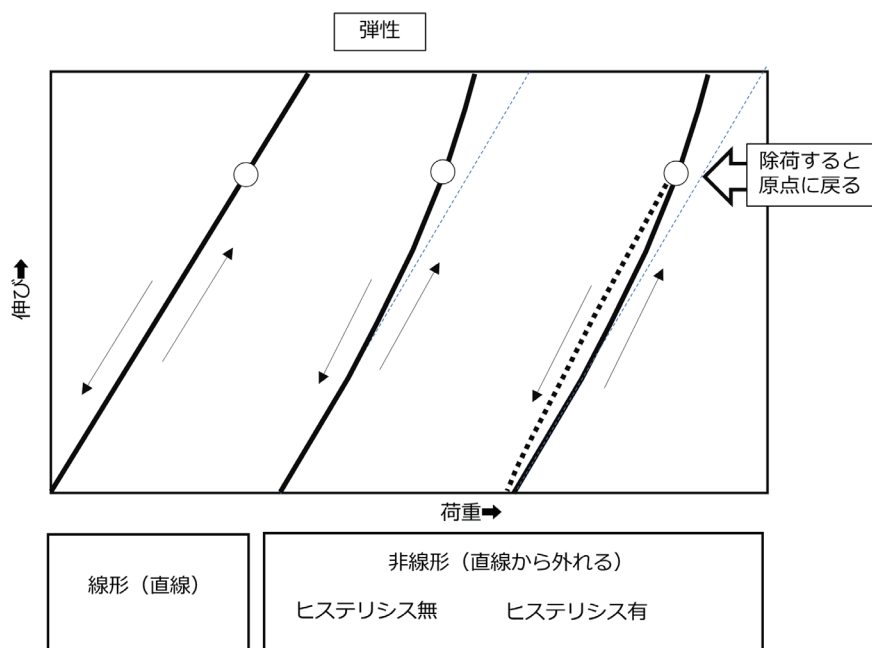
材料に関する知見も大きく変化していく。例えば、材料すべてが弾性ではない。確かに石は弾性で見なせるが、木に替わった鉄鋼は弾性であって弾性でないという姿を見せる。そこが材料の難しさであり、面白さともなる。

「弾性」^{D)} とは、伸ばされたり、絞られたり、曲げられたり、広げられたりした後、すぐに元のサイズ、形状、または位置に戻るという特性

ゴムの実験では荷重とゴムの伸びが比例し、その比例定数が弾性率だという説明を受け、これを「弾性」のすべてと思い込むことが多い。残念ながらこれは弾性の一部を述べたに過ぎない。弾性とは変形を加えてもその力を取り除けば変形前に完全に戻る性質をいう。そうすると原点に回帰する多様な負荷－除荷の変化を想定できるが、基本的には図表 4.02 に示すようなものに大きく分類できる。すなわち、(1) 線形、(2) 非線形でヒステリシス無、(3) 非線形でヒステリシス有（「弾性ヒステリシス」という。ヒステリシスとは、往路と復路が同じにならない現象とすると理解しやすい）がある。

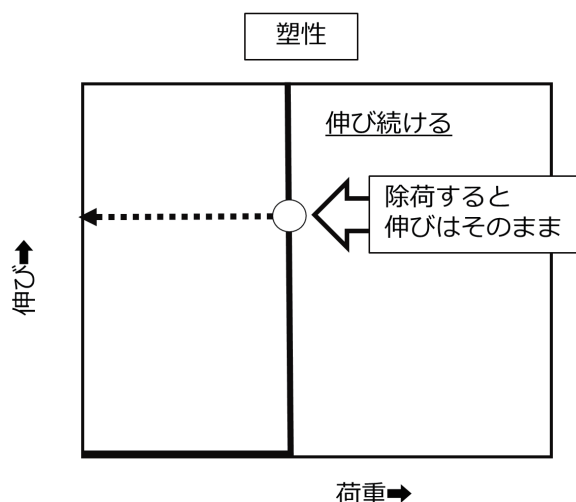
現実の金属材料は弾性ヒステリシスを持つ (3) のタイプとなる。ヒステリシスは外力による仕事を意味するが、熱となって散逸したり、内部構造を変化させるエネルギー源となったりする。

また、弾性変形はフックの式を見れば明らかなようにどんな歪（応力）でも成り立ち、歪（応力）に制限はなく、無限である。だが、後述する「理論強度」では金属結晶（原子モデル）の弾性変形の「理論限界」



図表 4.02 元に戻る弾性：いろいろなケースがある（筆者作成）

D) Elastic: having the property of immediately returning to its original size, shape, or position after being stretched, squeezed, flexed, expanded, etc.



図表 4.03 元に戻らない塑性 (筆者作成)

を議論するので、それをあたかも弾性体の歪 (応力) 限界のように思いこんでしまうことがある。

「塑性」^{E)} とは、型に成形できる、自由な形に成形できる性質

弾性の対語として塑性がある。変形の力を取り除くとその時点の変形を保存する (元の形に戻らない。永久変形ともいう) 性質が塑性と言える (図表 4.03)。変形に必要な荷重は、塑性体の「粘性」もしくは変形に対する内部抵抗に依存する。概念的には、同じ荷重で変形し続けるのが塑性である。原子モデルでない限り、変形体の断面積が無くなる (0 になる) ことはあ

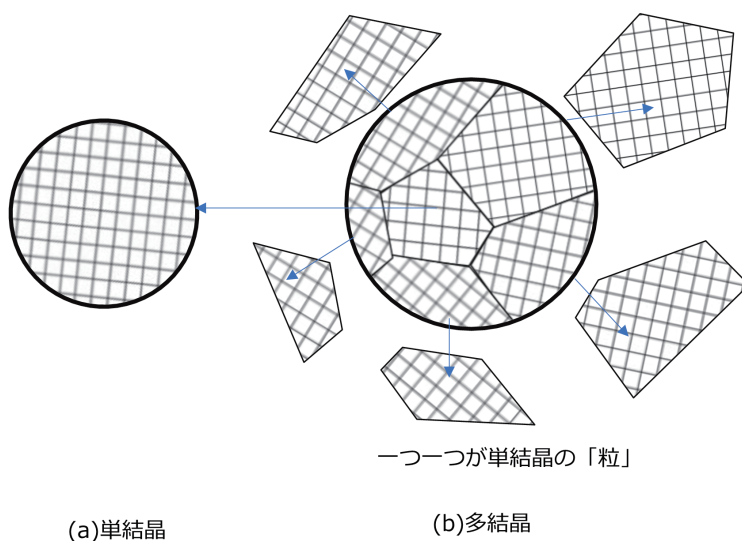
りえないので、ここでも概念上の変形は無限に続く。しかし、現実の塑性体は変形の途中で破壊し変形は継続できなくなる。

4.3 結晶粒概念の誕生¹⁾

力学は材料の塊を外部から見て扱うのに対して、材料学は試験片内部の微細な構造に切り込んでいく。

隕鉄、古代鉄、錬鉄などの研磨面を酸で腐食し、顕微鏡で拡大して観察すると内部構造が現れる。この手法は 18 世紀の末頃から始まった。隕鉄などの模様が独特のもの (天然の物質の美術的価値が言われた) と最初は思われていたが、これが人工の錬鉄でも一般的に観察されるものと分かってきた。ものの詳細を顕微鏡で拡大して観察するところから Metallography (金属組織学の和訳が定着した) という学問分野が生まれた。研究対象は微細な物理的構造と化学成分である。その微細な物理構造を microstructure (微視組織とする) と呼んで今日に至っている。

1898 年にジョン・エドワード・ステッド (John Edward Stead、1851 年～1923 年、イングランド) が論文「鉄鋼の結晶構造」において、細かい単位を「grain (粒)」と初めて名付け、いくつもの粒から成る多結晶という概念が確立した (図表 4.04)。これは、鉄の塑性変形において粒の方向性 (結晶方位と関連付けられる) を論じ、結晶のすべり面の理論を展開することに繋がっていく。



図表 4.04 多結晶概念の誕生 (筆者作成)

E) Plastic: capable of being molded or shaped

4.4 延性材料の引張試験

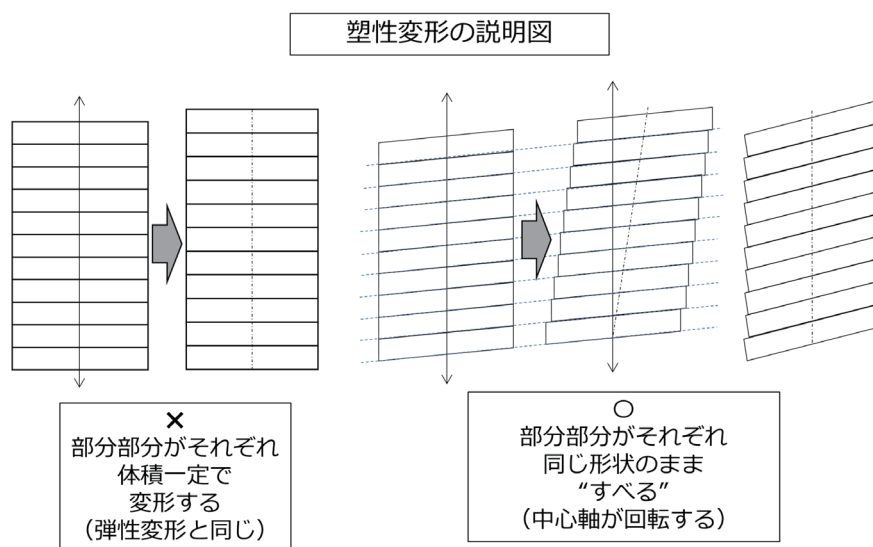
19世紀後半以降、延性材料であるアルミニウムや銅などの単結晶が得られ、延性に関する新しい知見が生まれ始めた。単結晶を引張るとある決まった方向で「すべる」ように変形する。引張った試験片の表面に方向性のある段差が生じることからの類推である。ここから「すべり面」「すべり方向」などの言葉が生まれた。

脆性材料は弾性体である。弾性変形している固体のどの部分をどのような大きさに切り取っても、そこに生じている応力、歪は同じ（相似性を保つ）となる。この弾性体には「すべり」は考えられない。

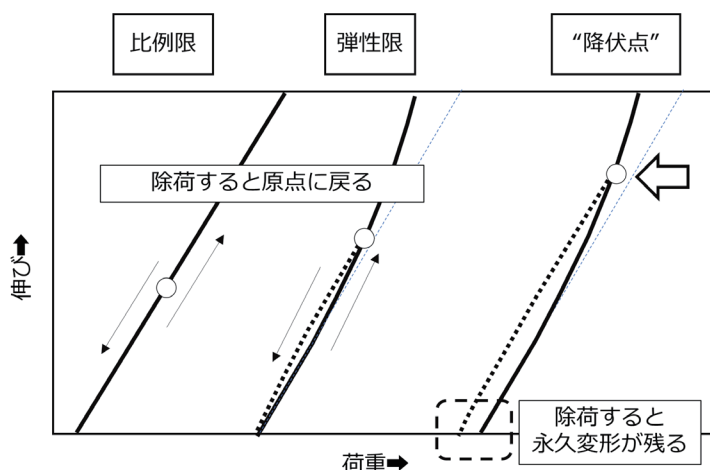
そこで、図表 4.05 のような提案がされた。固体を薄い弾性体のトランプカードが積み重なったようなも

のと考え、トランプ一枚一枚の間が滑ることを想定する。すべる前と後とを比べるとあたかも固体の軸が回転したかのようになり、外形は引張方向に伸び、引張方向と垂直な方向には縮み、塑性変形の観察結果をよく再現してくれる。単結晶を引張変形した際に表面にできるすべりや試験片に生じるねじりも上手く説明できる。弾性体の集合で延性を説明できるのが面白い。弾性体は寸法相似なのでマクロでもミクロでも同様の議論の展開が許される。

そこで、すべりを原子面での相対的な弾性的移動だと仮定して、すべりに必要な応力を計算すると実験値とかけ離れた極めて高い値になる。単結晶の引張試験では変形初期での弾性的な立ち上がりは小さく、多結晶よりもかなり小さい応力から変形し始める。すべりを持続させるのに必要な応力は、歪とともに次第に増加していく（歪硬化）。変形の途中で応力ゼロまで除



図表 4.05 塑性変形のトランプすべりモデル。トランプは弾性体である。（筆者作成）



図表 4.06 元に戻らないのが塑性（筆者作成）

荷すると変形が残ってしまうので単結晶は塑性体である。そこから再負荷すると弾性的に立ち上がり、除荷前の応力以上ではそれまでの応力－歪関係の延長を進む。この塑性変形開始応力の低さおよび歪硬化はトラップモデルでは説明できない。

1934年テーラー（G. I. Taylor）は原子モデルを考えた。原子の分布に局所的な乱れ（dislocation と名付けた。和訳は転位となった）を想定し、この乱れが結晶のすべり面に沿って小さな応力で移動することで塑性変形が生じるという新しい考え方を提案した。この乱れ同士が相互干渉することで歪硬化が起こることも説明できた。この提案が後に「転位論」として大いに発展する。

4.5 鉄鋼はいろいろ「変人」である

金属、特に鉄鋼は、変形の当初は弾性的だが、ある限界を超えると「塑性的」になる（図表 4.06）。その限界を「降伏点」と呼ぶことが多い。しかしこれは純粋な「塑性」ではない。変形継続に必要な荷重が増加していくことは、純粋な塑性とは言えない。変形と共に硬くなっていくのでこの現象を「加工硬化」ともいう（図表 4.07 左）。

厄介なことは尽きない。降伏点以上の負荷でないと永久変形が残らないかというところでもない。降伏点以下の負荷でもわずかな永久変形を示すことが多い。変形の測定精度を増せば増すほど、その変化点が低荷重側に下がっていく。

材料を変形させる実験器械は、歴史的にはまず錘な

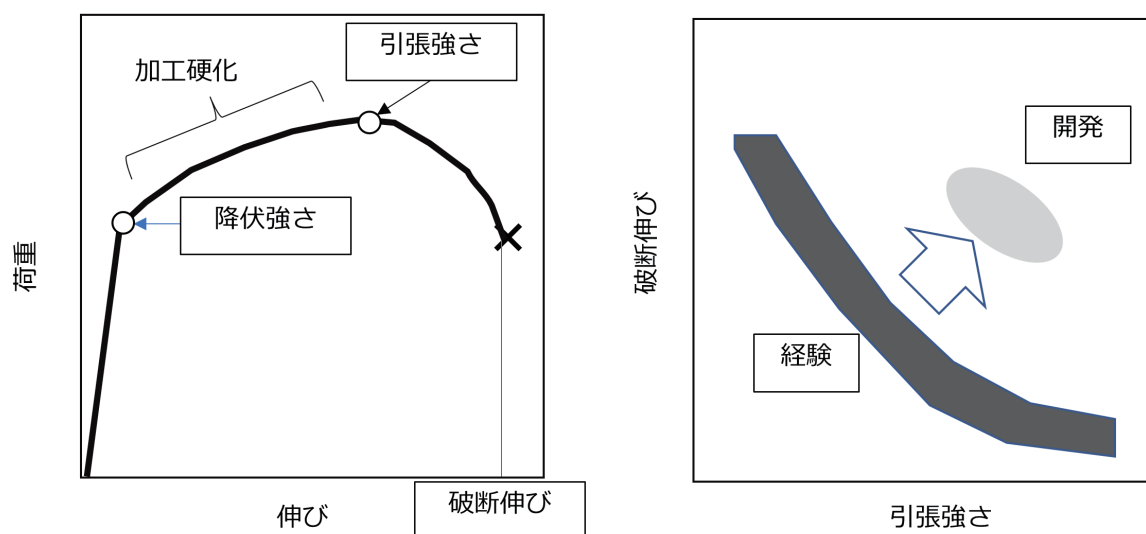
どで変形力（荷重制御）を与えて、それによる変形（伸び）を計測したので、X 軸に荷重、Y 軸に伸びを描いた。そのうちに材料にかかっている力を別途計測できるようになった。そこで金属材料に変形を与えた時（変形制御）に材料にかかる力を調べたら、荷重－伸び関係が最高荷重点まではそれまでのやり方（荷重制御）と同等と理解された。そこから、荷重制御試験から変形制御試験に大きく移行し、現在に至っている。それで、現代ではグラフの X 軸に変形量、Y 軸に荷重量を描くことが一般化した（図表 4.07 左）。フックの法則を X 軸：荷重、Y 軸：伸びで学んだ初学者にとっては、実用材料の試験規格では、あっさり逆転していて面食らい、とっつきにくい。

「引張強さ」

大きな力が加わった時に構造・部材がその外形を保持こたえ、壊れないことがまず問われる。その能力は「降伏強さ」「引張強さ」が目安になる。

「降伏点」と「降伏強さ」は同じなのか、違うのか疑問に思うだろう。強いて言えば、「降伏点」は現象を指し、「降伏強さ」はその荷重を測ったものとすればよい。

「引張強さ」は荷重制御試験時代この荷重で試験片が破壊したことに由来する。荷重がこれ以上になると試験片の変形は荷重を増さなくとも破壊するまで進むのでここが「破断荷重」となる。変形制御試験では図表 4.07 のようになり、「最高荷重点」の値は変わらない。両方を睨めばこの荷重を「引張強さ」とする合理性はある。しかし変形制御試験で「破断荷重」に至るにはさらに変形が必要になる。この点も初学者には混乱をもたらす。応力に換算すると「最高荷重点」以降も応力は単



図表 4.07 加工硬化、引張強さ、破壊（筆者作成）

調に増加していく。減少することはなく、歪硬化は続いていることに気付いて欲しい。

「理論強度」

結晶構造の原子結合が引張で切れるかせん断で切れるかの応力限界を「理論強度」と呼んでいる。せん断の場合、剛性率 80 GPa の 1/6 前後、10 GP 程度とされる。原子結合の破壊を議論しているのは確かである。原子モデルでのこの指標（＝ある一定値）はひとつの目安にはなるが、原子結合の破壊を実材料の耐破損性に直ちに結びつけることに筆者は躊躇う。

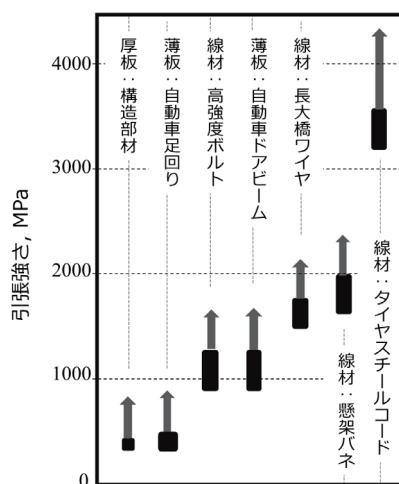
「耐破損性」

実材料はどこかで外見的に破壊して、変形は中断する。鉄鋼の変位制御型引張試験では破壊点までの伸びを「破断伸び」と呼ぶ（図表 4.07、左）。経験的には引張強さと破断伸びはトレードオフ関係（図表 4.07、右）にある。需要側は高強度でかつ破断伸びの大きい材料を求める。破断伸びの大きいものが耐破損性は高いと経験的に知られているからだ。このように、この破壊点が実用上極めて重要な意味を持つのだがこの破壊点が実はあまり深く研究されていない。にもかかわらず、要求にこたえて鉄鋼開発史は歩みを刻んできた（後述）。材料研究はこのような未熟さ（経験則）と、奥深さ（経験則の打破）を同時に持っている。耐破損性は弾性からも塑性からも導き出せない。その原理が分からなくてもたまたま耐破損性を高める手段を見つければ経験則を打破する材料開発に遭遇できる。

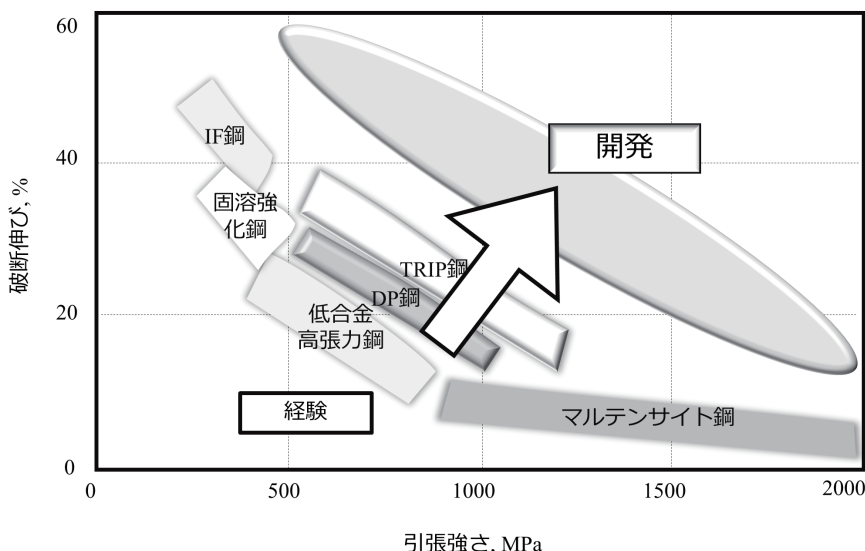
4.6 強いだけではだめ、耐破損性を高くする

各種の実用強度範囲²⁾を図表 4.08 に示した。スチールコードの 4 GPa 超が最高値であり、実験室的に見てもこれを大きく上回る高い破断強度の報告例はない。これを理論強度と比較してよいかは疑義があるが、4 割というところである。ここから高強度利用の伸び代は随分あるという研究者もいる。

ところが、図表 4.08 が示すように最高強度が 1 GPa にも達していない分野がある。しかもその分野が実は最も使用量の大きい厚板構造用や薄板自動車用である。機械部品分野では 1.5 GPa を超える実用例がある



図表 4.08 鉄鋼の高強度利用限界は製品分野ごとに違う（文献 2 を参考に筆者作成）



図表 4.09 鉄鋼材料の引張強さと破断伸びの関係（文献 3 を参考に筆者作成）

が、構造材料分野では1 GPaに達していない。

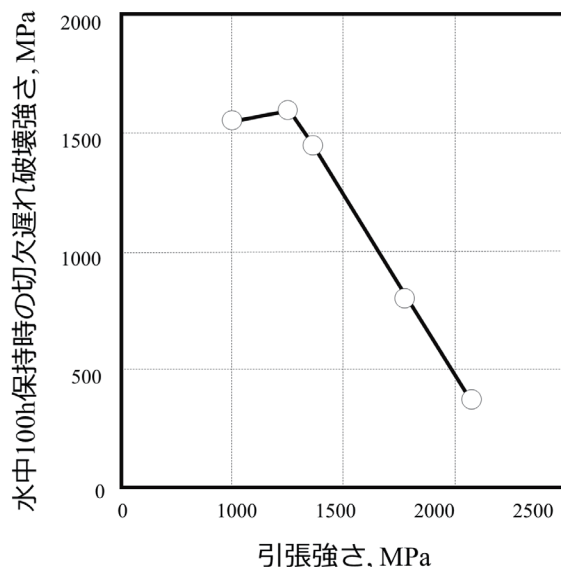
なぜこういう限界があるのか。これは必要な性質が強度だけではないからだ。もし強度と共に他の性質も向上すればよいが実態は全く逆である。図表 4.09 は薄板分野³⁾を説明しているが、同じ分類でみると強度が増すほど耐破損性（この場合は破断伸びで示す）は明らかに低下する。しかし、需要家は高強度－高耐破損性を望むので、経験論に抗して材料開発は進み高強度かつ高耐破損性の新しい鉄鋼が開発される。実用強度を高めるためには耐破損性を高めないといけない。

耐破損性は破断伸びだけでなく、1 GPaを越える辺りから、破断伸びの他に、耐疲労性、耐き裂性、溶接性などで評価される他の耐破損性が使用基準を満たさなくなる。その顕著な例は図表 4.10 に示す水素起因の破壊強度である。材料強度を上げれば上げるほど破壊強度が低下する領域がある。これは「強いほど弱い、耐破損性が低下する」典型例である。

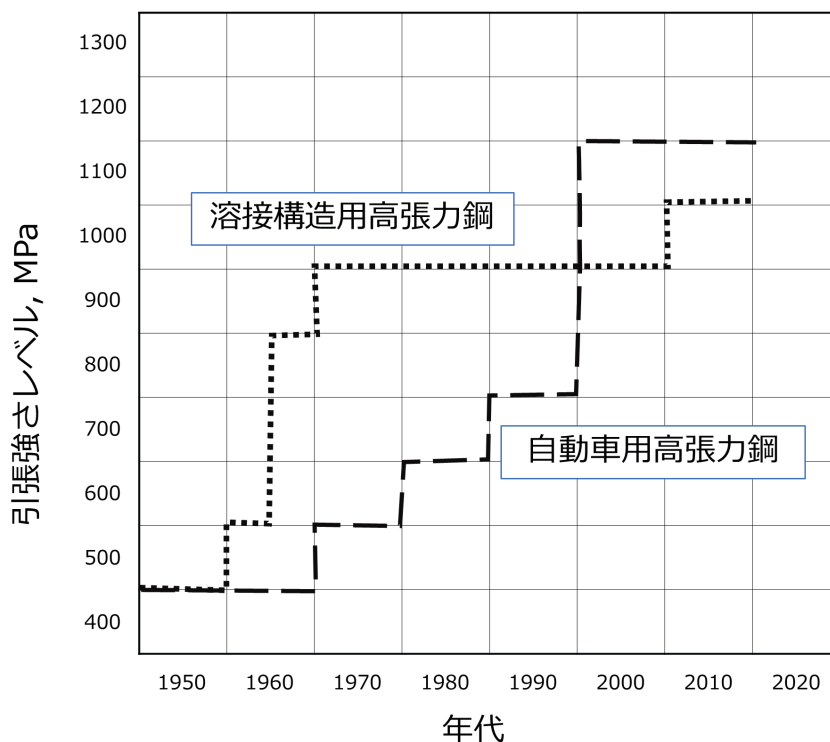
このように高強度利用の障害は材料強度ではなく、耐破損性にある。図表 4.09 は材料強度と破断伸びを同時に高める改善例が積み重なってきた歴史も示しているが、高強度での耐破損性の改善例はまだまだ少ないことも物語っている。

4.7 日本における「高張力鋼」の発展^{4) 5)}

「高張力鋼」は「ハイテン材」と呼ばれることも多い。これは“High Tensile Strength Steel Sheets（高張力鋼板）”という英語から由来したもので、日本で多用される略語のようである。世界では低合金高張力鋼 High Strength Low Alloyed Steel という意味で



図表 4.10 高強度ほど弱くなる代表的な例
(文献 2 を参考に筆者作成)



図表 4.11 高強度利用史の例 (文献 4,5 を参考に筆者作成)

HSLA 鋼と略称することが多い。張力とは引張強さのことである。

当初は、引張強さが 500 MPa 級で、溶接性が考慮された構造用低合金鋼を指した。その後用途が拡大(特に自動車向け)されるにつれ、引張強さがある程度の以上のものを広く指すように変わっていったが、「構造物の重量軽減と加工の簡単容易化、耐久性、高性能化のために使う」鉄鋼を指すのは不変である。

したがって、満たすべき性質は材料強度に留まらない。例示となるが、溶接構造用として満たすべき性質は以下のように多面的である。

- 材料強度が高い。正確に言えば、引張強さが高いだけでなく降伏比（降伏強さ／引張強さ）も高く。
- 溶接性が良い。材料強度と溶接性は一般には相反するので、材料強度の増加に伴い溶接施工の工夫が必要になる。
- 耐き裂性が優れている。材料強度と耐き裂性は相反するので、耐き裂性を高めるために良く精製し、細粒とする。
- 耐摩耗性、耐食性が優れている。合金元素を添加し必要な特性を得る。
- 安価である。広範かつ大量に使われるので高いと採用されない。

戦前から高張力鋼の国産化、材料強度上昇が求められたが、主流は輸入のままだった。また、強度水準も 400 MPa 級が主で、500 MPa 級は用途が限定されていた（艦艇、潜水艦など）。戦後になって海外の高張力鋼技術の輸入から、1960 年代以降、国産化と材料強度上昇が盛んになった。材料強度上昇は溶接構造用厚板から始まって、造船、橋梁、建設などの大きな需要に応えた。鋼材の形状としては厚板や棒材となる。薄板は自動車用に用途が拡大した。プレス成型を念頭

に置き、高延性前提での高強度化が図られた（高延性重視では、より低強度化・高延性志向もある）。さらに 1 GPa を越える「超ハイテン化」が話題となっていく。溶接構造用厚板の超ハイテン化はしばらく足踏み状態だったが、溶接性などの改善が図られ、21 世紀に入って超ハイテンの実用例がでてきた（図表 4.11）。

本稿ではこれらの材料の詳細には触れない。それでも高強度利用に立ちはだかる諸課題に研究者・技術者が格闘してきた姿を垣間見ることになる。

4章のまとめ

構造材料としての鉄鋼には、低価格で高強度利用と軽量の両立への寄与が期待される。ところが、高強度では脆性破壊、疲労、腐食、高温クリープなどへの耐性が低下する。これらの耐性を高めないと信頼性は向上できない。鉄鋼の「ハイテン化」は信頼性を高めて「使える高強度」の限界を突破してきた歴史の途上にある。

参考・引用文献

- 1) 長井寿, 守谷英明, アジアから鉄を変える－新しい鉄の基礎理論, 東洋書店, 東京, (2013)
- 2) 中山武典, 鉄鋼材料の高強度化と防食技術, 材料と環境, 48, (1999), 484-489
- 3) 高橋学, 薄板技術の 100 年－自動車産業と共に歩んだ薄鋼板と製造技術, 鉄と鋼, 100, (2014), 82-93
- 4) 堀川一男, 高張力鋼の歴史, 安全工学, 15, (1976), 1-7
- 5) 柴田浩司, 我が国における溶接構造用高張力鋼の発展とその特徴, 鉄と鋼, 67, (1981), 1026-1029

5 | 信頼性向上のための科学と技術のプラットフォーム

鉄鋼技術の主たる担い手は産業界である。だが、アカデミアをはじめとした公的セクターの役割も大きい。特に、信頼性向上、産業規格整備においては不可欠である。

5.1 西欧における材料試験所の開設 (1865年以降) から国際試験材料協会の設立 (1895年以降) へ

鉄鋼が普及し、鉄鋼の性質を実験的に調べるのが必須となった。そのために多くの国々が材料試験所を設立した (図表 5.01)。

イギリスでは個人企業が試験所をつくった。そのうちで成功した一つに 1865 年ロンドンのサウスワークに開設のカーコルディ (David Kirkaldy, 1820 年～1897 年、スコットランド) による試験所がある。カーコルディは独自の試験機、試験片、取付具を作り、当時使われていた鉄鋼の性質を自らの著書に非常に詳しくまとめた。

ドイツ、オーストリア、スイス、スウェーデン、ロシアなどでも材料試験所を設立し、それぞれの国のそれぞれの目的のための材料試験を実施した。多くは政府の手で整備を進め、工科大学内に試験機を設置した。

いろいろな試験所での試験結果を相互比較できるようにするためには、試験方法を統一する必要がある。

1899 年 8 月にペンシルバニア州ピッツバーグで開催された国際試験材料協会 (International Association for Testing Materials) のアメリカ支部年次総会での Mansfield Merriman 会長による演説¹⁾がこの時代の国際的合意形成の過程を詳しく紹介している。このアメリカ支部は、現在の ASTM International の前

身である。

『1850 年に特殊用途の大型試験機が製造され始めた後、伸びと延性が注意深く研究され始め、1870 年以降すぐに、製品の均一性を確保するために金属の物理的試験が不可欠なことが多くの製造者に認識された。これらの試験を増やすにつれて、試験片の強度はそのサイズと比率、および荷重が加えられた方法に依存するという知識が得られた。…結果を比較できるようにするには、同様の方法で試験を行う必要があることが分かった…信頼できる結論に到達するように努めるために、国際試験材料協会が設立された。』

彼の講演によると、1882 年バウシンガー (後述) が呼びかけ、ドイツ人実験者が多数ミュンヘンに集まった。それを受けて、1884 年ドレスデン、1886 年ベルリン、1888 年ミュンヘン、1893 年ウィーンと、正式な会議が継続的に開催され、ヨーロッパ諸国からの代表者が出席するようになった。米国は支部を作って参加した。

1890 年パリで開催された国際工学会議を受けて、フランス政府が建設資材試験の標準的方法を策定する委員会を任命し、1894 年に報告書を発行した。だが、単一国による決定は国際的に意味をなさなかった。

1895 年チューリッヒでの第 5 回会議にはトルコを除くすべてのヨーロッパ諸国の代表が参加した。米国政府とアメリカ機械学会も代表者を派遣した。この会議で国際試験材料協会が正式に発足し、「建設材料およびその他の材料の特性を決定するための標準的な試験方法の開発と統一および試験装置の完成」を目的に決めた。ここに国際的統一規格制定の源流を見ることができる。

図表 5.01 ヨーロッパ各国に設置された材料試験所 (筆者が作成)

国	設立年	都市	材料試験所	指導者
イギリス	1865	ロンドン	個人企業	D. Kirkaldy
ドイツ	1871	ミュンヘン	ミュンヘン工科大学	J. Bauschinger
	1871	ベルリン	ベルリン工科大学	A. Martens
	1879	シュトゥットガルト	シュトゥットガルト工科大学	C. Bach
オーストリア	1873	ウィーン	ウィーン工科大学	K. Jenny
スイス	1879	チューリッヒ	チューリッヒ工科大学	L. Tetmajer
スウェーデン	1875	リルエホルメン	鉄鋼産業	?
ロシア	?	ペテルブルク	ペテルブルク交通工科大学	N. A. Bebelubsky

19世紀末からの材料科学および材料力学の進歩は急だった。材料試験の国際会議には、ますます多くの技術者と物理学者が集まるようになった。前者は材料の力学的性質に、後者は固体の物理学に関心があった。力学的性質と固体物理学を結合し、かつ産業界の課題に正面から向かう専門研究所が設立されたのもこの時期である。ドイツでは1883年にドイツ理工学研究所（Physikalisch-Technischen Reichsanstalt）をベルリンに設立し、物理学者の研究と産業界の要求を近づける役割を果たした。これを手本にイギリスでは1899年に国立物理学研究所（National Physical Laboratory）、アメリカでは1901年に国立標準局（National Bureau of Standards）を設立した。名称からは信頼性向上技術と関係があるとは見えないかもしれないが、材料の力学的性質の研究のための大きな実験室を持ち、その実験に不可欠な精度の高い測定法の物理的な科学研究と機器開発を行った。

民間企業も科学研究の重要性を次第に認めはじめ、企業研究所の設立を急速に進めた。その結果、材料の力学的研究の量が増加するだけでなく質も変わってきた。

材料力学および弾性学の基礎は既に確立していた。その結果、構造工学の応力解析はすでに行き渡っていた。20世紀ではその適用が複雑な形状と負荷応力分布を持つ機械部品の精密な応力解析に向いていく。一方、金属を初め固体の微視的内部構造に関する科学研究はこの時代に根底からの発展期を迎えた。驚くような発展は、1901年から始まったノーベル賞にも如実に反映している。

その頃の日本はどうだったか。明治は1868年10月23日に始まり、1900年に閉じる。日本の鉄道は1872年10月14日に新橋駅～横浜駅間で正式開業して、しばらくは鉄原料もしくはレールそのものも輸入に頼っていた。橋梁などについても良質な鉄原料はほぼ海外に依存していた。1900年に官営の八幡製鉄所が設立され、1901年からレールの生産が始まった。

1871年に工部省工学寮（後の工部大学校）を開校した。1871年には「大蔵省造幣局試金場」という日本初の試験研究機関も設置した。そこでは金属成分分析は行われたようだが、強度試験等を実施したかは分からない。1885年に度量衡のメートル条約に加盟し、1889年原器を交付されている。材料試験については未だ手つかずで、日本の国際試験材料協会へのこの段階での参加は時期尚早だったようである。

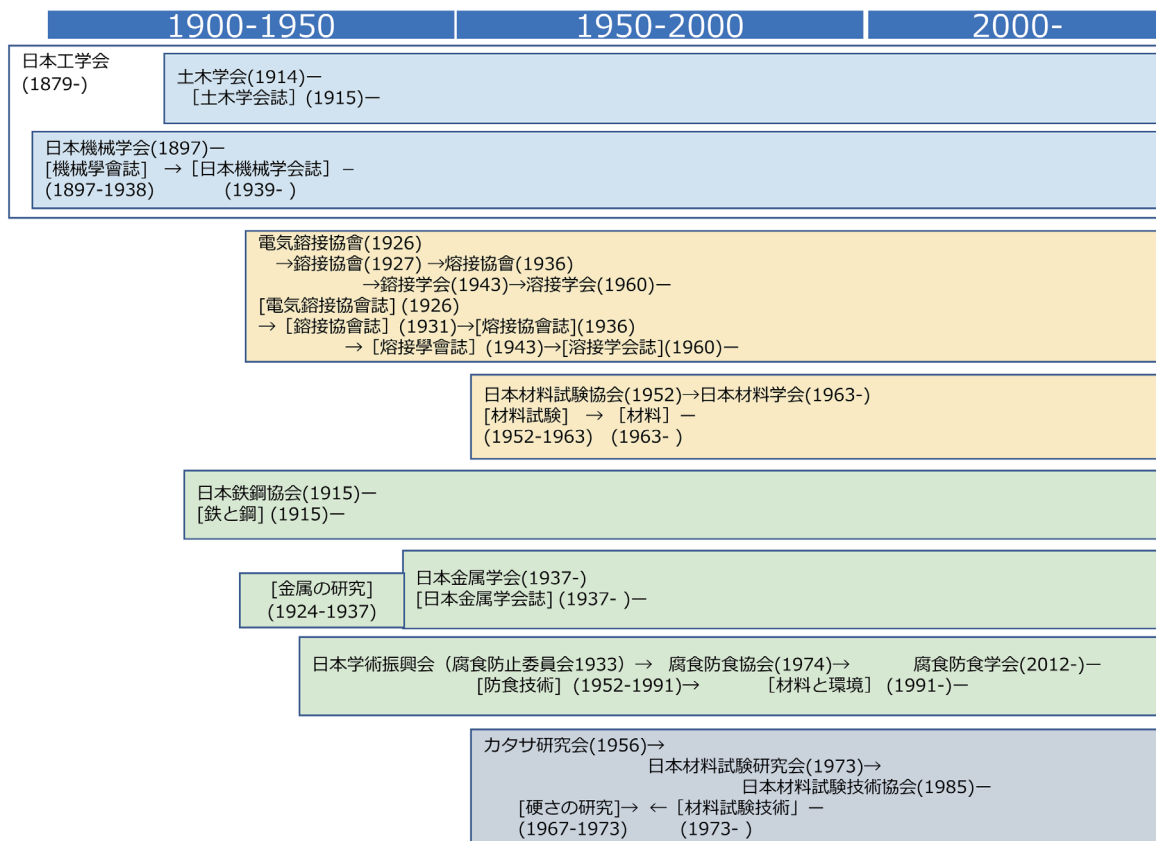
5.2 鉄鋼に関わる工学系学会の始動と展開

図表 5.02 に見るように、工学系学会は工部大学校卒業生の親睦会から始まった日本工学会に起源がある。そこから、日本鉱業会（1885年）、造家学会（後の日本建築学会、1886年）、電気学会（1887年）、造船協会（後の日本造船学会、1897年）、機械学会（1897年）、工業化学会（後の日本化学会、1898年）などが次々と独立し、残った土木技術者も土木学会（1914年）を設立した。これらの個別学会は日本工学会の傘の下に自らを位置づけた。日本工学会は現在でも、100近い工学系学会を会員とする学会の横断的組織として活動している。

西洋式鉄鋼生産体系が1900年前後から始動し、あまり時期を置かずに鉄鋼、金属、溶接などの専門学会も組織されていく。その後、腐食の学会もでき、材料試験機に関わる工業会、協会なども揃うのが1950年頃となる。いわば、1900年～1950年は日本での鉄鋼の信頼性向上技術の「導入期」と区切ることができよう。

日本鉄鋼協会は、1915年2月6日に設立され、同年3月30日には機関誌「鉄と鋼」を創刊し、活動を開始した。その創刊号の巻頭祝辞で、今泉嘉一郎（1867年～1941年）（1912年日本鋼管創業に加わる）はその先進モデルをドイツ鉄鋼協会（1880年設立）に求めている。同協会の機関誌である「スタール・ウント・アイゼン、Stahl und Eisen」が、「学術的経済上の論説、報告を遺憾なく会員に紹介し、34年間一日のごとくドイツ製鉄事業の発展に努め」た結果、1880年に270万トンだった生産量が1912年に2000万トンを越え、英仏を凌駕し米国に次ぐまでになったことに驚嘆し、「機関雑誌は世界各国に配布せられ専門技術者をして随一の参考書たらしむ。およそ一個の私立協会としてその活動、（中略）わが鉄鋼協会の亀鑑とするに足るべきものならん」²⁾とし、着実に活動、事業を進め、追尾することを謳っている。1910年頃の日本の粗鋼生産量は20万トン程度で多くを輸入に頼っていた時代である。

戦前の「鉄と鋼」では欧米はじめ世界の鉄鋼業、研究所、大学などの調査（文献、実地）による設備などの詳細な報告が目立つ。国内の現状報告も合わせて掲載されている。多くないが、高温クリープ、脆性破壊、疲労、腐食など信頼性向上技術に関するテーマを見ることができる。それが日本におけるすべてを網羅しているとは言えないが、鉄鋼に関する主要な取り組みを反



図表 5.02 鉄鋼に関係が深い日本の学協会設立と展開（筆者作成）

映しているものとして、それぞれ簡単に概要をまとめてみる。年代としては1950年までを戦前を含む区切りとして扱う。

また、鉄鋼以外の金属も扱う日本金属学会（1937年2月14日設立）が東北大学において、本多光太郎（1870年～1954年）を中心に旺盛な活動を展開し始めている。日本金属学会誌（1937年創刊）を発行し、そこにも信頼性向上技術に関わる貴重な報告もある。また、それに先行し「金属の研究」という学術誌が、東北大学金属材料研究所（1916年4月1日を設立日としている）から1924年～1937年の間発行されている。

中「科学技術」という新熟語を生み出した背景にもあるという。

また、「学協会」（learned societies and other associations）も、とくに戦前期日本で一般的に使用されていた用語で、学術的な学会・研究会から技術者などの同業者団体や業界団体に近いものまでを含めた概念としてそのまま用いられてきた。特に、産業界の技術者などが高いプレゼンスで活躍できる場として「学協会」は良い響きの用語だったようである。

戦前・戦後の鉄鋼を対象とした官立研究機関（大学、国立研究所）の設置と展開³⁾⁻⁶⁾も年表的に見てみる（図表 5.03）。

5.3 鉄鋼に関係する官公立研究機関の設置と展開

日本では「研究開発」活動の担い手となる組織のことを戦前から「試験研究機関」（testing and research institutes）と呼び、研究業務だけでなく試験・検定業務を行う機関も含めた概念として位置づけてきた。これは日本の「研究開発」（research and development）活動が研究というよりも試験・検定業務を中心に行っていたことと関係している。現実として欧米でいうような「開発」はやれていなかった。それが戦時

5.3.1 1887年 東京帝国大学など

1887年に文部省は東京開成学校と東京医学校を合併して、法・理・文・医の四学部制の東京大学を設け、工部省は工部学校を母胎として工部大学校を置き、それぞれ多数の外人教師、外人技術者を招き、近代科学と技術の移植・育成を急いだ。採鉱・冶金科は当初からあった。その後、1907年以降、京都帝国大学理科大学、東北帝国大学理科大学、九州帝国大学工科大学を開設した。帝国大学の特徴として産業に直結した工科大学、農科大学を積極的に置いた点がある。旧七

帝大と東京工業大学に鉄鋼を対象とした学科が揃うのは1941年のことである。第一次大戦後急いで拡充したがこのテンポだった。それでも人材育成に極めて大きな寄与があったことはうかがえる。

5.3.2 1910年 帝国鉄道庁鉄道調査所

鉄道用材料に関する理学的試験は1910年8月に鉄道試験所の業務の一つとして開始された。第2科が「鉄道金属材料その他の理学的試験並研究」が担当となっている。1916年当時のこの第二試験室には主任室、事務室、試験機械室、加熱試験室、写真室、工作職場（試作工場の前身）があった。東京帝国大学の冶金学の依国一教授（1872年～1958年）が鉄道院嘱託として毎週金曜日に来訪し、後には東北帝国大学鉄鋼研究所長の本多光太郎教授も嘱託として上京の折には指導のために第二試験室に立ち寄ったといわれている。

5.3.3 1910年 秋田鉱山専門学校

第一次大戦を通じて「欧米工業国へのキャッチアップ」だけでは足りないことを痛感した。来るべき戦争は膨大な補給を伴う「総力戦」となる、戦争で諸外国からの輸入が途絶えとどうしようもなくなることなどを自覚した。そこで、工業製品の輸入代替、兵器の国産化を国家目標に設定し直し、それを支える「研究

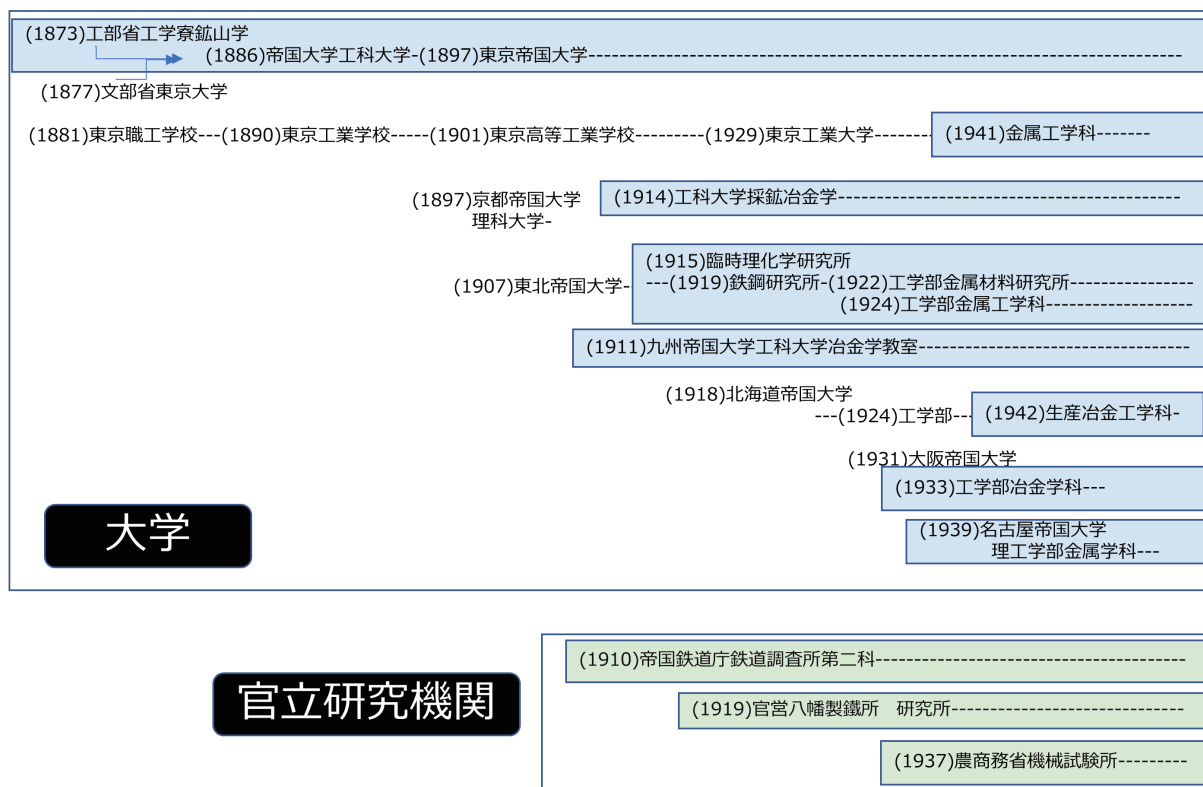
開発体制」の整備を国家的課題とした。理化学研究所、帝国大学付置研究所、陸海軍・官立研究所などの設置、帝国大学へ工学系学部増設、工業専門学校の開校などにより技術人材の育成を急いだ。

秋田鉱山専門学校が秋田市に民間からの寄付などにより1910年3月に設立された。設立時は採鉱学科と冶金学科だった。

5.3.4 1919年 東北帝国大学金属材料研究所

東北帝国大学の金属材料研究所は、物理冶金学に関する本多光太郎のすぐれた業績を中心に1919年設立された附属鉄鋼研究所を改組・拡充したものである。大学附置研究所は特定の一大学に附置してあるとはいえ、全国的な立場から設けられた研究機関であり、なかには特定の国家業務そのものを実施する使命を有するものも含まれていた。

金属材料研究所が誕生した頃の日本では、化学薬品や鉄鋼の自給の必要に迫られていた。そのため1915年8月に東北帝国大学理科大学に併設された臨時理化学研究所に不燃性セルロイドの研究を目的とする第1部が、続く1916年4月に鉄鋼の研究を目的とする第2部が本多光太郎を研究主任として発足した。以来、日本における金属研究の中心的存在として数多くの業績をあげ、すぐれた人材を世に送り出す先駆けとなった。



図表 5.03 鉄鋼を対象とした戦前の官立研究機関（筆者作成）

5.3.5 1919年 官営八幡製鐵所 研究所⁷⁾

製鐵所官制改正（1919年5月17日勅令第223号）によって、研究課にかわって製鐵所の中に研究所が設置された。この背景には、第一次大戦の勃発によりドイツは日本と交戦国となってドイツからの技術、機械の導入が途絶し、製鐵所も技術的に独立することが早急に求められた事情がある。

1919年に作られた研究所は主に科学研究と工業的研究に担当部署が分かれていた。①銑鉄部に関する研究、②製鋼部および鋼材部に関係する研究、③機械、電気、諸般動力に関する研究、④研究所に共通の実験、具体的には化学分析、顕微鏡、機械試験、工作、製図などである。

研究所は製鐵所に必要な科学研究をする一方で、関連して作業工場に研究成果を適用して諸問題を解決することを目指した。

5.3.6 1937年 機械試験所

1882年に設立された地質調査所を皮切りに次々と設立された農商務省（1945年商工省、1949年通商産業省）の国立研究機関のひとつに機械試験所がある。おそらく機械試験所は鉄鋼も所掌範囲に含んだ最初の国立基礎研究機関と思われる。1952年には通商産業省の国立試験研究機関は工業技術院にまとめて組織された。

5.3.7 1956年 科学技術庁、金属材料技術研究所^{8) 9)}

第二次大戦で日本の産業は徹底的に破壊され戦後の日本経済は疲労困憊の極に達していた。生産や輸送は麻痺状態となり国民は食料難とインフレにあえいでいた。特に航空機産業は破壊され生産施設の賠償指定により完全に存在しなくなっていた。また、戦争中大学の工学部に設置されていた航空学科は廃止され、日本の将来には航空機産業の発達は望めないような状況だった。だがこの時期、基礎産業の傾斜生産、米国の対日占領政策の大転換、朝鮮動乱の勃発、賠償問題の解決等により、民間の重化学工業の合理化計画が策定されて外国技術の導入などが盛んになった。

戦後約10年経ち、日本の科学技術がようやく一時期の停滞から抜け出し、産業の立ち直りと歩を合せて活動を見せ始めた。占領状態を脱した日本において、科学技術行政機構が未整備だと不満を持っていた国会議員が中心に議員提案をまとめ、1953年8月7日の第17国会において「科学・技術振興決議」が全会一致で採択された。主な内容は、(1)科学技術行政機構の強化 (2)科学研究予算の拡大、(3)科学技術教育の

振興、(4)科学技術者の優遇、(5)研究成果の実用化のための国庫補助及び金融措置の実施などである。

しかしこの決議は結実することがなかった。そこで1954年10月15日に経済同友会は「科学技術促進対策」を発表し科学技術にかかわる総合的行政機関の設置を政府に強く要望した。「外国技術の導入に依存する我が国の科学技術の現状に対する懸念」を表明し自主開発促進の必要性を強調している。総合的な行政機関の設置、科学技術教育の促進、「科学技術開発公社」と研究組合の設立などを提案した。科学技術政策を経済政策及び産業政策の一環として位置付けている。

そのような中で、1954年に工業技術協議会（工業技術院長の諮問機関）において金属材料に関する総合的研究所を設立すべきとの意見があり、また航空技術審議会においても航空機材料の研究体制強化が強く要望された。さらに工業技術院は金属材料研究委員会（通商産業省内関係部課長で構成）での審議の結果、国立もしくは特殊法人の研究所を設立するという結論に達した。1955年7月内閣総理大臣から航空技術審議会に諮問された「関係行政機関の航空技術に関する研究のための経費を必要とする計画の連絡調整に必要な措置」に対して、1955年11月に提出された答申は「金属材料技術研究所は、航空機工業に必要な金属材料に関する研究に主眼をおくこと。金属材料の研究は広範な分野にわたるものであるから、航空機材料においては、その特殊性のあること等からみて緊密な連絡をとりつつ計画を進めること。」（一部要約）等の内容を含むものだった。

その後、政府提案としてまとめられた「科学技術庁設置法案」が1956年3月26日に成立し、1956年5月19日に総理府の外局の一つとして科学技術庁が発足した。発足時の内局定員は関係各省庁からの定員の移し替えにより204名（航空技術研究所及び1956年に発足した金属材料技術研究所の定員を加えると293名）、予算は15億円だった。

設置法第17条 航空技術研究所は、航空技術の向上を図るため必要な研究及び試験並びに調査で、次の各号に掲げるもの（略）を行い、あわせて、その施設及び設備を関係行政機関の共用に供する機関とする。

設置法第18条 金属材料技術研究所は、金属材料その他これに類する材料の品質の改善を図るため必要な研究を行う機関とする。

当時の工業技術発展の課題は、まず米欧先進国の技術を導入、消化して生産効率と品質を大幅に向上させ、新しい品質、製品の製造を可能にすることにあった。一方、航空機、宇宙、原子力開発など国家的な革新技术の育成推進も重要な課題となっていた。これら産業発展と国家的開発目標を達成する上での重要課題の一つとして、それまで先進国に比べて品質と性能の面において遜色がみられるとされていた国産材料の品質改善が強く要望^{F)}されるようになった。

このように金属材料技術研究所は1956年4月予算成立とともに経費1億円、人員40名（うち20名は機械試験所より移管）として正式に認められた。以後工業技術院から科学技術庁に設立事務が移管され、1956年7月1日金属材料技術研究所（以下、金材技研）が誕生した。1963年度にほぼ第一次整備段階を終了した。

機械試験所より出向した技官は、河田和美、三橋鉄太郎、吉田進、田中龍男、上野學、中川龍一、津谷和男、木村勝美、荒木喬、吉田英彦、細井祐三、俣野宣久、横井信、渡辺亨、中島宏興、田村皖司、磯野譲、大庭幸夫、村松晃、川瀬晃、池田清一の諸氏（21名）である。

新研究所は、管理部と研究四部の体制で発足した。管理部の部長は戸部健次郎、庶務課長は石井義馬で、企画課長は河田和美が代行し、上野學が課長補佐、細井祐三が係長に就いた。

トップ人事は、科学研究所として東京大学小川芳樹教授（兼任）、研究部長として、東京大学より小西芳吉教授（兼任）、東北大学・金属材料研究所より柳原正部長、機械試験所より河田和美部長、八幡製鉄株式会社より遠藤勝次郎部長が定まり、新研究所が発足した。

5.3.8 1972年 溶接研究所

溶接研究所の必要性は早くから言われていた。1931年に溶接協会の本部が大阪帝大内に置かれたが、1939年の溶接協會誌には、舞鶴海軍工廠造船部長福田烈の寄稿¹¹⁾で『大學に熔接研究所の設立と熔接講座設置促進に關する意見』は、“極めて複雑で、従来の経験理論では解決できない多くの因子を含んでいる溶接の実体を確かめないといけない。それを正しく応用し、事故等を起こさないようにするために、溶接の根本の研究を大学で行うべきだ。各帝大に付置されている航空研究所、金属材料研究所、地震研究所等と並んで、溶接研究所を設置すべきだ。総合大学に設置し、理学部、工学部あるいは医学部から直接の援助をうけない

と課題解決できない”と本質的な提言をしている。

この産業界などからの要望が戦後に実を結ぶ。1964年に日本学術会議が政府に大学付置の共同利用研究所として溶接研究所の設立を勧告¹²⁾し、1966年政府の省議で研究所の設立を決定した。

1969年に大阪大学工学部に溶接工学研究施設が設置され、1972年に全国共同利用施設として溶接工学研究所が発足した（現在は接合科学研究所となっている）。

5.4 標準化へ対応と展開

1895年に国際試験材料協会が発足したことは既に述べた。1865年以降、各国で材料試験所が設置され、その中でドイツを核として、国際会議を数回開催しての出発である。これは、「(材料の) 特性を決定するための標準的な試験方法の開発と統一および試験装置の完成」を目的とする点で先駆的だった。

ここでは、試験法について定義、説明、使い方などをまとめたものを「規格」と呼び、「規格」を国内的もしくは国際的に共通化、統一化することを「標準化」とする。

5.4.1 標準化への全体的な歴史的経緯^{13) -15)}

18世紀後半フランスで、兵器部品の互換性担保のために規格制定を講じたのが発端とされる。皮肉なことにフランスでは浸透せずに、アメリカで銃器、マシン製造などに適用され、「フォード・システム」の大量生産システムにつながっていく。

「同じさ」を保証するためには、部品であれば形状、寸法、さらには重量などが「同じ」であるべきである。明白、明確な度量衡の計測基準が求められ、フランスのメートル法が国際的な先導役を果たす。

1875年のメートル条約は、度量衡の国際的な統一を目的とした。1921年の第6回国際度量衡総会により、すべての物理単位を対象とする条約に改正した。1960年の第11回国際度量衡総会で単位系は精査され、「国際単位系（SI）」が始動した。日本は1885年に条約に加入している。

個々の生産者が個々に工業規格を定めている段階から、国全体で「同じ規格」を定めるのが良いという段階になる。そのための標準化機関が各国で設立される。

F) 北海道新聞(1967年1月11日)¹⁰⁾は、インドの原子炉材料の入札の際、長時間のクリープ試験データがないという理由で、入札資格さえ与えられなかったというエピソードを紹介している。

イギリスが先陣を切り、第一次大戦後に各国に波及する。

1901 年 イギリス：Engineering Standards

Committee) ➡ BS (British Standards)

1917 年 ドイツ：Normenausschuß der Deutschen

Industrie) ➡ DIN

1918 年 オランダ、アメリカ：American Engineering

Standards Committee) ➡ ANSI、

フランス：Commission Permanente de

Standardisation) ➡ NF (Norme Française)、

スイス

1919 年 カナダ、ベルギー

1920 年 オーストリア、ハンガリー

1921 年 イタリア、日本：工業品規格統一調査会

➡ JIS、オーストラリア

1922 年 スウェーデン、チェコスロヴァキア

1923 年 デンマーク、ノルウェー、ソ連

1924 年 ポーランド、フィンランド

並行して国際標準化も意識される。その点で先行した電気通信技術は 1881 年以降国際電気会議を開き、1906 年には、電気設備・機器などの標準化機関として、国際電気標準会議 (IEC) を設立した。

それ以外の工業製品に関しては、1921 年に幹事会が申し合わせ、1926 年に「万国規格統一協会」(ISA: International Federation of the National Standardizing Association) の設立が決定された。ISA は 1928 年に正式に発足し、国際規格の設定を管理していた。しかし、ISA は第二次世界大戦の影響を受け、1942 年に活動停止となる。その後、1944 年に連合国が「連合国規格調整委員会」(UNSCC: United Nations Standards Coordinating Committee) を設立し、1947 年 2 月に、ISA と UNSCC を統合した、「国際標準化機構」(ISO) が発足した。

一方、日本での産業規格への取り組みの経緯を年代順に記すと以下ようになる。

1921 年～ 1941 年：日本標準規格 (JES)

工業品規格統一調査会

1939 年～ 1945 年：臨時日本標準規格 (臨 JES)

同上

1938 年～ 1945 年：日本航空機規格 (航格)

航空機技術委員会 (2 回改名)

1946 年～ 1949 年：日本規格 (新 JES)

日本工業標準調査会

1949 年～ 2019 年：日本工業規格 (JIS)

日本工業標準調査会 (JISC)

2019 年以降：日本産業規格 (JIS)

日本産業標準調査会 (JISC)

規格を巡る状況は時代と共に変化する。特に 1995 年は大きな変わり目となった。国際的基準が複数ある事態は確かに国際市場では合理的ではない。また、特定の国内規格が優位を占める状態を放置しておくことも自由貿易の観点からは憂慮される。1995 年 1 月に WTO (世界貿易機構: World Trade Organization) が発足した。日本は 1994 年 12 月の国会で WTO 協定を批准し、発足と同時に加盟した。これ以降、国内規格である JIS に準拠し貿易するのではなく、WTO が認める国際規格に基づき貿易することが国際的決まりとなった。その後、JIS は国際規格 (例えば ISO) 準拠に書き換えるとともに、日本は国際規格の基準作りへの参画を進めている。

また、日本では 1994 年 7 月に国会を通過した製造物責任 (PL) 法が 1995 年より実施され、もの作りにおける製造側の責任が一段と強まる時代に入った。もの作りには企業連関があり、材料供給-製品組立-使用者という流れがある。製造者の中でも使用者に近い側の製造者責任をより強く問う仕組みになった。

これらの仕組みの変化がもたらす功罪や変化への対応不適合などがあり得る。四半世紀を過ぎて、一度冷静に総括してみるべき時機と筆者は考える。

5.4.2 金属材料の力学的性質試験 JIS 規格にはどのようなものがあるか

JIS の規格は、原案作成団体 (工業会、学会、日本規格協会等) が、原案作成委員会をガイドラインに沿って組織し、監督官庁のチェック等を経て、それを主務大臣が「日本産業標準調査会」(分野別に専門委員会がある) に諮り、審議、修正等を経て、成案となったものを主務大臣がパブリックコメント等を受けて国内のコンセンサスを得たのち認可して公布される。改正においても同じ仕組みで行われる。

JIS で現在まで制定された本稿に関連した規格は下表のとおりである。1950 年代制定のものは、引張、曲げ、衝撃、高温クリープであり、70 年代に疲労が加わり、90 年代以降に大気腐食関係が整えられ始める。

鉄鋼に関係する JIS 規格の原案作成においては、多くの実績と貢献があり、それらが継承されている (社) 日本鉄鋼連盟・標準化センターが中心となる件が多い。試験規格においてもその役割は大きい。

耐き裂性については、「G 0564: 金属材料-平面ひずみ破壊じん (靱) 性試験方法」が、1999 年に制定されたが、2020 年に廃止されているのでこのリストには掲載しなかった。「破壊靱性」については後述する。

JIS 以外によく参照されるものとしては学会基準が

図表 5.04 鉄鋼の信頼性向上技術に関する JIS 規格
(文献 16 を利用して、筆者作成)

JIS番号	規格名称	制定	最新改正
Z 2241	金属材料引張試験方法	1952年 7月22日	2011年 2月21日
Z 2242	金属材料のシャルピー衝撃試験方法	1952年10月23日	2020年12月21日
Z 2248	金属材料曲げ試験方法	1952年10月23日	2022年 3月22日
Z 2271	金属材料のクリープ及びクリープ破断試験方法	1956年10月 2日	2019年 3月20日
Z 2274	金属材料の回転曲げ疲れ試験方法	1974年 5月 1日	1978年 7月 1日
Z 2275	金属平板の平面曲げ疲れ試験方法	1974年 5月 1日	1978年 7月 1日
Z 2381	大気暴露試験方法通則	1979年11月 1日	2017年 3月21日
Z 2382	大気環境の腐食性を評価するための環境汚染因子の測定	1998年 6月20日	
Z 2383	大気環境の腐食性を評価するための標準金属試験片及びその腐食度の測定方法	1998年 6月20日	
Z 2384	大気腐食モニタリングセンサ	2019年 9月20日	

ある。疲労試験法の内、JIS 化されていないものでも日本材料学会および日本機械学会が定めた学会基準がある。破壊靱性試験法については日本機械学会が定めた学会基準がある。

溶接継手試験の JIS 規格の数は金属材料の力学的性質試験規格よりも多い。1956 年～1962 年の間に制定・整備され、その後、技術の展開に伴って制定・改正を繰り返している。日本溶接協会が規格の制定・改正等のナショナルセンターになっている。

大気腐食関係では、腐食防食学会が JIS 原案作成団体として貢献している。

5章のまとめ

日本の鉄鋼技術においては民間産業が主導的な役割を果たしてきたといっても過言ではないが、公的研究機関も重要な役割を果たしてきた。大学や研究機関は基礎研究において重要なだけでなく、鉄鋼の信頼性向上技術の進歩のために複数の専門分野の連携にも大きく寄与した。また、学会や公的研究機関は、一企業ではできない大規模な実験や長期試験、産官学連携の研究の実施主体となった。

参考・引用文献

- 1) Mansfield Merriman, The Work of the International Association for Testing Materials, Science, New York Vol. 10, No. 247 (Sep. 22, 1899), 396-402
- 2) 今泉嘉一郎, 日本鐵鋼協會の設立並に其機關雜誌第一號の發刊を祝す, 鐵と鋼, 1, (1915), 3-5
- 3) 文部科学省『学制百年史』, https://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/html/others/detail/1317552.htm, (2022 年 11 月 1 日閲覧)
- 4) 青木洋, 『戦前期日本における試験研究機関・学協会の制度化とその特徴』, 経営史学, 46, (2011), 30-55
- 5) 沢井実, 戦間期日本の研究開発体制—官公私立校苦行試験研究機関の変遷とその特質, 中村哲編集, 『東アジア近代経済の形成と発展—東アジア資本主義形成史 I』, 日本評論社, 東京, (2005)
- 6) 沢井実, 『近代日本の研究開発体制』, 名古屋大学出版会, 名古屋, (2012)
- 7) 長島修, 官営八幡製鐵所における研究開発の制度化, 立命館経営学, 48, (2009)
- 8) 金属材料技術研究所編, 『三十年のあゆみ』, (1986 年 7 月 1 日)
- 9) 金属材料技術研究所編, 『目黒の思い出』, (1986 年 7 月 1 日)
- 10) 北海道新聞、ただいま研究中①、メタルの寿命試験、

- 金属材料技術研究所、(1967年1月11日),9面
- 11) 福田烈, 大學に熔接研究所の設立と熔接講座設置促進に関する意見, 熔接協會誌, 9, (1939), 1-2
 - 12) 日本学術会議, 溶接研究所(仮称)の設立について(勧告), 1964.05.18, <https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/03/06-16-k.pdf>, (2022年10月31日閲覧)
 - 13) 長谷川亮一, 近代日本における「標準化」の概念について, 『日本における「標準化」の史的考察』(千葉大学人文社会科学研究科 研究プロジェクト報告書 第217集), 千葉大学大学院人文社会科学研究科, (2012), 3-14
 - 14) 日本産業標準調査会, 産業標準化とJIS, <http://www.jisc.go.jp/jis-act/index.html>, (2022年11月1日閲覧)
 - 15) 日本規格協会, 60年の歩み－創立60周年記念, 日本規格協会, 東京, (2005)
 - 16) 日本産業標準調査会 JIS 検索: <https://www.jisc.go.jp/app/jis/general/GnrJISearch.html>, (2022年11月1日閲覧)

6 | 脆性破壊

鉄鋼はもともと弾性＝脆性とされていたが、19世紀には塑性を持ち、室温で延性＝可鍛性がある鉄鋼が作れるようになった。しかし、それも低温に持っていくとやはり脆性だった。

脆性破壊の発生を抑える力学条件(温度条件を含む)を知りたいというのが狙いになる。

脆性破壊は非時間依存型の材料負荷によって生じる破損である。低温で現れる現象なので温度支配だと考えるのが自然であるが、負荷応力や応力負荷速度も関係しており、必ずしも単純に理解できない。その材料に固有の破壊応力というものがあるのか、あるとすればどうしたら測定できるのか…などと考えながら読んでいただきたい。

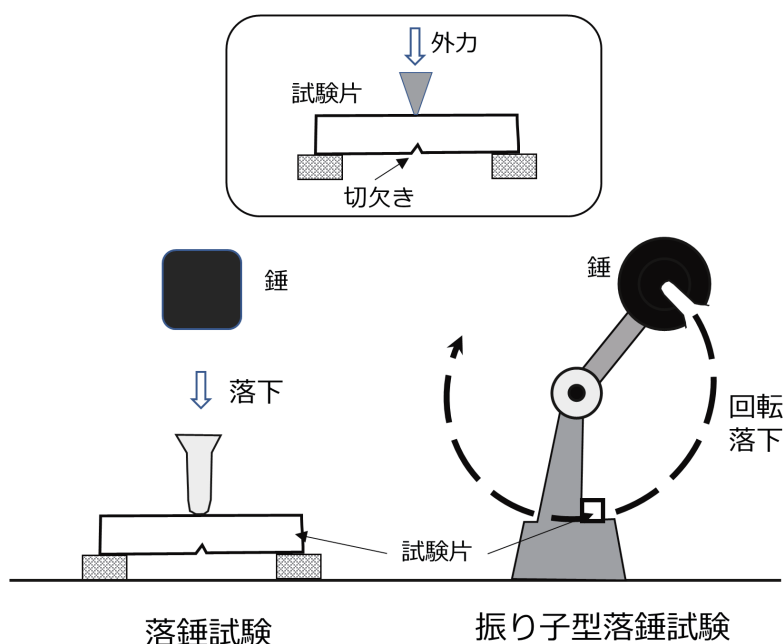
6.1 シャルピー試験機の誕生まで(1900年以前)

アンウィン (W. C. Unwin)¹⁾によると、鉄鋼の低温における力学的性質を調べた最初は、フェアベアン (W. Fairbain)、Report of the British Association (1857年)によるとされている。フェアベアンは、リベット用鉄の -30°F (-33°C) の強度が 60°F (27°C) のそれよりも若干高いことを報告した。鉄鋼の衝撃抵抗が低温で減少することを最初に指摘したのは、アンドリュース (T. Andrews) だろう。アンドリュースは

鉄道車軸の一連の実験をしており、寒冷地で鉄道敷設、橋梁建設が進んだので、 -45°C での鉄鋼の力学的性質を知る必要が生じた。

ハッドフィールド (R. A. Hadfield) は、1905年に入手できたと思われるほとんどの鉄合金について、 -182°C で引張試験を行った²⁾。その結果、脆性破壊しにくい鋼として低炭素ニッケル (Ni) 鋼を提案している。その Ni の効果について、“Iron is a very crystalline metal, whereas nickel appears to be much more amorphous; it is possible, therefore, that nickel tends to prevent iron crystallising” と考察している。脆性に関する当時の理論は、1902年～1914年に著された教科書・参考書によると、例えば “Brittleness is the sudden interruption of molecular cohesion.”³⁾ , “If a metal is crystalline, and the cohesion between the crystals is feeble, then the metal is brittle.”⁴⁾ などとされている。後日これらの「理論」は完全否定される。経験的には、鉄鋼の切欠感受性は高い、純度が悪いと脆化しやすい、脆化しやすさと鋼の強度とは無関係などは早くから知られていた。

低温用途の拡大につれ、衝撃に対する性質を求める試験法(図表 6.01)の確立が望まれるようになる。文献に見られる最初の衝撃試験設備は、1890年前後である。前述のアンウィンによると、年代不明だがクチェラ (Kuczera) とライニッシュ (Reinisch) による -4°F



図表 6.01 衝撃試験：試験片、落錘試験、振り子型落錘試験（筆者作成）

(-20℃)での落錘試験、シャルピー (M. G. Charpy)⁵⁾によると、1892年ルシャトリエ (M. A. Le Chatelier)による幅1 mm、深さ1 mmの切欠きを入れた正方形断面棒での落重試験などが初期のものとして紹介されている。錘を振り子型にしたのは、1897年ラッセル (M. Russel)である。錘の重さや高さを変える落重試験と比べると容易さが増した。

後世“pendulum drop-weight machine”をシャルピー試験機と呼ぶようになるのは、シャルピーがこの形式を発明したからでなく、試験機の規模、錘の重さ、振り上げ高さ、試験片形状、切欠形状などが破断吸収エネルギーに与える影響、さらには再現性などについて精力的に実証的な研究を行い、この手軽な試験法の確立、普及に努めたからである。シャルピーは試験機の発明はしていない。

6.2 遷移曲線と脆性理論 (1900年～1940年)

シャルピー試験機の登場で、試験温度を変化させ脆性温度範囲を決めることが可能になった。

図表 6.02 の左図のような曲線が得られる。理想的なケースを描いたが、高温側の脆性のない上部棚 (延性) から、低温側の脆性を示す下部棚に「遷移」し、下部棚では吸収エネルギーはゼロに近くなる。これを遷移曲線と呼んでいる。破断した破面を観察しその延性破面率を横軸にとると、右図のように破断吸収エネルギーは延性破面率と完全に対応できる。

原理が導かれていない状況では、信頼性に結び付く耐破損性の指標 (この場合は破断吸収エネルギー) と試験条件や材料指標 (この場合は延性破面率) との一对一の関係を探し出すことが理解の発展および安全基

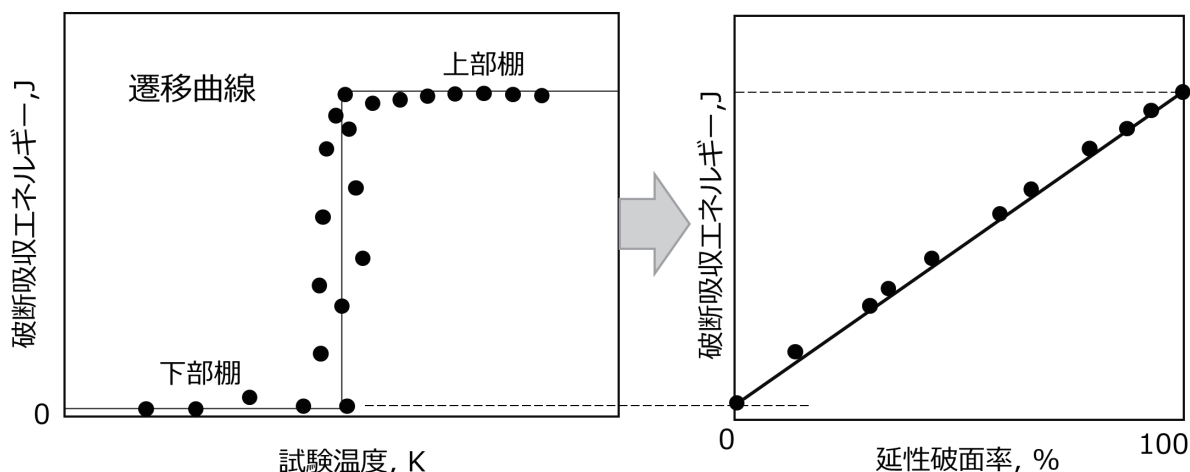
準の設定などに極めて有効になる。

1925年頃、低温脆性 (ドイツで、Kaltsprödigkeit、英語に直訳すれば cold brittleness。現在では low temperature brittleness) という用語が生まれた。日本でも、1925年には研究が始まっており、1935年には藤井芳郎⁶⁾が「臨界帯脆点」という言葉を用いて低温脆性を論じている。これは世界的に見ても「遷移温度」の最も早い概念の一つである。欧米では、1937年に設計上の安全基準として、吸収エネルギー 10 ft-lb 以上を保証できる温度域をキンゼル (A. B. Kinzel) とイーガン (J. J. Egan) が提唱した⁷⁾ことが、「遷移温度」概念の契機となったようである。

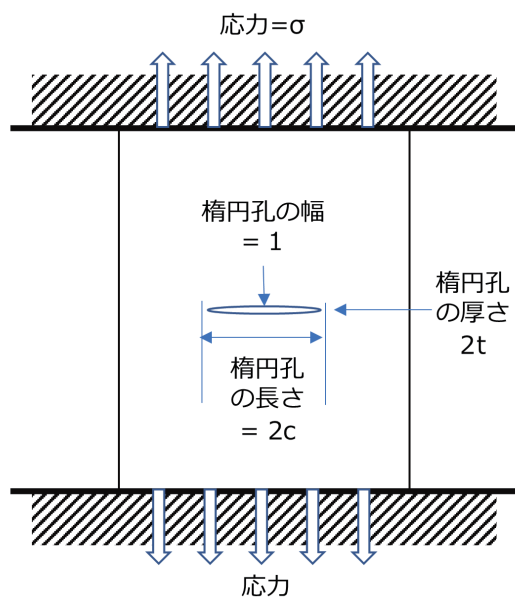
続けて破壊力学の基礎となる概念が提唱された。脆性を示すガラスの引張試験で得られる強度は小さく、破壊に要する仕事も小さい。だが、分子同士を引き離すのに必要なエネルギーを弾性率から見積もると、測定強度の3万倍にもなってしまう。この大きなギャップをどう説明するかという問題が投げかけられていた。

1920年にグリフィス (A. A. Griffith) が“The Phenomena of Rupture and Flaw in Solids”⁸⁾を発表した。グリフィスの疑問は脆性破壊の切欠き感受性が高いことだった。ガラスの強度が低下するのは内部に顕微鏡的に小さいき裂があってこれが切欠きと同様に応力増幅すると考えた。切欠きは肉眼で見えるという意味で「マクロモデル」であるが、彼は「表面につけた切欠き」を“内部の微細なき裂”という「ミクロ」イメージに置き換えた (図表 6.03)。このような微細なき裂の実在は検証しようがなく、あくまでも仮説なので「グリフィスキ裂」とわざわざ断って論じる場合もある。

彼はこのき裂を板厚貫通の極めて薄くて細長い楕円孔と仮定し、き裂ができることで開放される歪エネルギー (弾性エネルギー) が、き裂が新しい破面 (表面)



図表 6.02 試験温度を変えて遷移曲線を得る (筆者作成)



図表 6.03 グリフィスのき裂モデル（筆者作成）

を作るために必要な仕事（＝表面エネルギーもしくは表面張力）を上回ると、外から何ら追加の仕事を加えなくともき裂が成長し破壊に至るというクライテリアを設定した。これをき裂「発生」基準と捉える誤解も一部にある。

詳しい説明は省くが、弾性論に基づくので、固体の弾性率、表面エネルギーが分かれば、破壊応力とき裂の長さの関係が定まる。き裂が大きいほど限界応力が低くなることを明かに説明している。脆性破壊が「不可思議」な現象から脱し、基礎研究の対象となった。

6.3 破壊の確率論の登場（1930年以降）

1939年ワイブル（W. Weibull）は、（脆性）材料の破壊強度の実験値はただ一つではなく平均値の周りに一定の分布を持つことを確率論の立場から論じた⁹⁾。

彼は、破壊確率 S を試験片内に一様に分布する負荷応力の関数として定義した。極めて低い応力域では $S=0$ すなわち破壊しないが、十分高い応力域では $S=1$ すなわち確実に破壊し、 S は応力による増加関数になるとした。試験片モデルとしてある長さのrod（体積が単位体積）の直列モデルと並列モデルいずれも想定したが、確率論的取り扱いは同じとした。その後、直列モデルは、Weakest Link Model（最弱環モデル）として、素材、構造体などの破壊モデルとして定着していく。

脆性材料の破壊強度の測定値は確かに「バラツク」がこの整理で解析すると、確率論的な「バラツキ」か、

実験や試験片準備の不備による「バラツキ」かなどの判断に適用できる。また、破壊強度を決定する因子が複数ある場合や不明な場合の考察に役立てることもできる。

6.4 戦前の足跡

日本でも脆性破壊の研究では水準の高い試みが比較的早くから見られる。

【鉄と鋼】

9巻（1923年）では、室井嘉治馬、武内武夫（住友金属工業）が、落錘式の衝撃破壊試験を実施¹⁰⁾している。錘重量、落下高さを調節して与える衝撃エネルギーを変化させて吸収エネルギーを測定した。完全破壊断する場合は、衝撃エネルギーを変えても吸収エネルギーには影響がないことを確認している。

14巻（1928年）では、吉川晴十（呉海軍工廠）が、鋤鉄、鋳鉄のアイゾット式衝撃試験を実施¹¹⁾している。

18巻（1931年）では、室井嘉治馬（住友金属工業）がシャルピー衝撃試験機を用い、それに光学装置を付けて、衝撃の際の力－変形曲線の計測¹²⁾を試みている。現在の計装化シャルピー試験の原型とも言えるものである。

21巻（1935年）には、渡辺三郎、永澤清（日本特殊鋼）が、 $-60^{\circ}\text{C} \sim +25^{\circ}\text{C}$ の温度範囲でのエネルギー遷移曲線¹³⁾を描いている。エネルギー遷移曲線の（この調査における日本での）初出である。低温脆性を起こさない鉄鋼の開発を目指している。

22巻（1936年）には、永澤清（日本特殊鋼）の同様の報告があり、試験温度範囲は -190°C ¹⁴⁾までに広がっている。

この後、脆性破壊、衝撃特性に関する報告は、「鉄と鋼」には見当たらない。

【日本金属学会誌】

8巻（1944年）には、池島俊雄（住友金属工業）が、低合金鋼、オーステナイト鋼の -80°C および -183°C での衝撃値（アイゾット型）に及ぼす各種合金元素、熱処理の影響をつぶさに調べた結果を報告¹⁵⁾している。寒地使用（航空機含む）、液化石油・ガス工業などの実用のための調査である。

9巻（1945年）では、壽時富彌（東北帝国大学）が、種々の金属材料の液体窒素温度までの、シャルピー衝撃試験を実施¹⁶⁾している。

【機械学会】

会誌 31巻（1928年）には、吉川晴十（呉海軍工廠）

による脆性全般のよくまとまった概説¹⁷⁾が掲載されている。脆性の種類、試験機の種類などをまとめているが、この時代に既に水素ガス吸収による脆性についても触れていることが注目される。

会誌31巻(1928年)には、山田良之助(東京工業大学)による衝撃破壊の際の応力—時間変化曲線の実測¹⁸⁾を示している。

論文集12巻(1947年)では、柏原方勝(日本鋼管)が、鋼種によって「切欠感受性」が異なる¹⁹⁾ことを実験的に求めている。

衝撃試験と脆性破壊に関する試験方法や考え方は、民間を中心に、欧米に早くから追随している。試験機には動力が不要で、簡便かつ原理が明快だったことがその要因のひとつと思われる。

グリフィスの公式のひとつの求め方

応力 σ により、楕円孔が弾性的に開口している。開口最大幅 t は、応力 σ 、弾性率 E ($=2G$)、長さ $2c$ により、

$$t = \frac{c\sigma}{G} = \frac{2c\sigma}{E}$$

となり、 x 位置の開口幅は長軸 c 、短軸 t の楕円上にある。

応力 σ に逆らって、楕円孔を閉口させる($t \rightarrow 0$)のに必要な仕事 W は、開口方向の弾性仕事を $-c$ 、 c 間で積分したものとなる。

x 位置の弾性仕事 w は

$$w = \frac{1}{2} \times (\text{応力}) \times (x \text{ 位置の開口幅})$$

x 位置の弾性仕事も楕円上にあるとする。長軸 c 、短軸最大 w の楕円面積 πcw が求めるものとなる。

$$\begin{aligned} W &= -\pi cw = -\pi c \left(\frac{1}{2} \times \sigma \times \frac{2c\sigma}{E} \right) \\ &= -\frac{\pi c^2 \sigma^2}{E} \end{aligned}$$

こうやって閉口させたものは、無垢な試験体に入れるために付加的な仕事は要らないので、 W は楕円孔によって開放されている弾性エネルギーとなる。

グリフィスは、「閉じたき裂」(=き裂が“潜在”しており、無い状態と考える)が開くと新しい表面を作る。その仕事 S は、 γ を表面張力(表面エネルギー)とすると、

$$S = 4c\gamma$$

となる。

き裂が成長するときは、

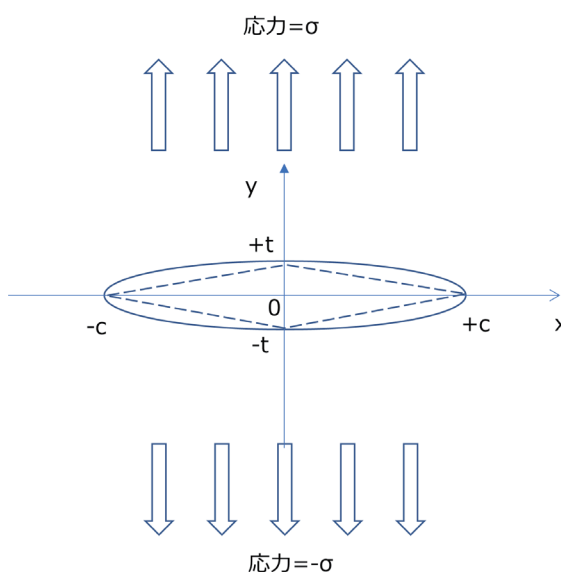
$$dW = -dS$$

$$\frac{\delta}{\delta c} (W + S) = 0$$

$$\text{ここから、} \sigma^2 = \frac{2\gamma E}{\pi c}$$

のいわゆるグリフィスの公式が得られる。

ここで述べた導出法は厳密なものではないが、原理の理解には役立つだろう。



図表 6.A1 グリフィスキ裂の力学条件 (筆者作成)

6.5 戦後発達した様々な破壊靱性評価試験法^{20) -22)}

アメリカでの戦時標準船の脆性破壊を契機に、溶接継手のように元々内部にき裂がある疑いが強い構造、もしくはき裂ができやすい構造を前提に、「き裂を持つ構造が破壊に耐えうる力学的環境の上限」を定められないかという試みが大展開した。この「力学的環境の上限」を「破壊靱性」とし、定まった評価法で実測された上限を「破壊靱性値」と呼ぶことが多いが、ここでは単に「破壊靱性」と呼ぶことにする。

破壊が実際問題となるのは実構造物なので、実体寸法の大型の装置立てで、力学的環境の上限を決定するのが本筋である。だが、大型試験を常とするのは無理である。大型の実条件を再現できる小型模擬試験が望ましい。

破壊靱性の考え方に違いはあっても、延性域と脆性域の境界をどう定めるかが一番大事だろう。脆性域を何で決定するか、温度で見るか、応力、歪で見るかなど、決定法の選択肢は多々あり得る。微視的に破壊形態を見る立場からすると金属で完全な脆性破壊を断定しにくい、極めて小さな仕事で急激に破壊する事象として脆性破壊を扱うことは力学的には妥当である。

また、破壊はマクロな観点で論じるのが好都合である。き裂の成長開始条件を定めるのか、き裂の高速成長条件を定めるのか、き裂成長の抑制条件を定めるのか、いろいろな視点があるが、全体としては、き裂成長を効果的に抑制する力学的条件を定めるのが大事と考える。

6.5.1 シャルピー試験

JIS Z 2242：金属材料のシャルピー衝撃試験方法²³⁾がJISに規定されている。

動的負荷による破断吸収エネルギー結果が基準値以下である試験温度を脆性域と判定する。歴史的に有名なのはアメリカの船体構造委員会が戦時標準船の脆性破壊を調査、分析して定めた「10 ft-lb（もしくは15 ft-lb）」で、長年定着している。この基準値の採用によって著しく破損事故は減ったが皆無とはならなかった。そこでイギリスの船級協会が再検討して延性破面率30%以上も考慮した35 ft-lbがより安全であると結論付けた。これは厚鋼板の溶接構造船体等に積極的に適用されている。負荷は「動的」である。

JIS Z 2242：金属材料のシャルピー衝撃試験方法での「遷移温度」の決め方は、ここで述べた既定の吸収エネルギーとなる温度の他に、吸収エネルギーが上部

棚エネルギーの特定の百分率（例：50%）となる温度、破面率が特定の百分率（例：50%）となる温度、横膨出量が特性の値となる温度などが紹介されている。

6.5.2 落重試験（ここでは、Naval Research Laboratoryによる落重試験を紹介する）

JISには規定されていないが、「JEAC 4202：フェライト鋼の落重試験方法」（原子力規格委員会）²⁴⁾がある。

爆発、衝突などの急速変形によって、鉄鋼はへき開を起こしやすくなる（変形速度が増加すると遷移温度が上昇するという説明が一般的）。その脆性き裂が瞬時に板厚を貫通すれば大事故になるが、へき開がわずかに起きてそれが成長しない上限の温度（Nil-Ductility Transition Temperature）を判定する。小型だが十分な厚さ（5/8インチ以上）を持つ板材に切欠を加工した試験片を使う。負荷は「動的」である。

他の落重試験法でも動的負荷下で脆性き裂の成長を抑制する力学的限界条件を求める点が共通している。

6.5.3 平面歪破壊靱性試験

JIS G 0564：金属材料－平面ひずみ破壊じん（靱）性試験方法は、2020年にJISから廃止²⁵⁾されている。廃止の理由は「対応国際規格であるISO 12737は2010年に廃止された。使用実態もないことから廃止する」となっている。

元々脆性材料であれば気にすることもないが、金属材料ではき裂周りに「平面歪」状態が実現できるようにし、き裂先端近傍の「小規模降伏」しか「塑性変形」を許さないという構えとなっている。試験においては、き裂が成長し始める荷重をどう決定するか、求めた荷重が仮定条件を満たすかの検証が大事になる。負荷は「静的」な部類である。

「平面歪」検証は意外と壁になる。例えば、フェライト鋼は十分な低温では「脆性材料」だが、室温では強度水準が低い「延性材料」なので、「平面歪」条件を満たしにくい。試験片の板厚をかなり増やせば「平面歪」条件を満たせるようになるが、それでは「小型試験法」ではなくなる。「延性材料」であるオーステナイト鋼では、相当強度水準が高くないと「平面歪」条件を満たせない。極めて単純化していえば、この方法は破壊靱性が低いものには有効だが、高いものにはあまり「有効」でない。

6.5.4 J積分

JSME S001：弾塑性破壊靱性 JIC 試験法（増補第1

版)²⁶⁾を日本機械学会が定めている(1981年10月15日、増補版1992年2月29日)。

これは学理的には線形破壊力学の発展形になる。『弾塑性破壊靱性』とするようにのっけから弾塑性体を対象にしている。したがって、延性的過ぎて有効な破壊靱性値が得られない場合、エンジニアリング的には受け入れやすい。

学理的な点を避けて説明すれば、負荷を増加していくとJ積分が上昇しまずき裂が「開口」するだけだが、さらにJ積分を上昇させると「き裂」が安定成長するようになり、最後には急速成長し試験片の破断に至る。この「安定」成長開始のJ積分値を限界値として求める。

いくつかの方法があるが、試験片、き裂の形状、大きさと荷重によりJ積分は計算できるので、「き裂成長」をなんらかの方法で測れば良い。

6.5.5 小型 COD 試験

WES 1108：亀裂先端開口変位(CTOD)試験方法を、日本溶接協会が定めている。JISには規定されていない。

イギリスでは、アメリカの平面歪破壊靱性試験法での三点曲げ試験片を外形的にはそのまま使い、限界CODを定めるという規準を定めた。大きな特徴は、疲労予き裂を導入する際に応力拡大係数の平面歪条件を満たせばよいと単純化した点、そしてき裂が成長し始める荷重の決定ではなくその予き裂が成長し始める時の限界COD(Crack Opening Displacement)を計測することに換えた点にある。この試験での負荷は「静的」にも「動的」にも与えることができる。

こうやって決定される限界CODは、様々な構造体においてき裂の存在を前提とした際にき裂が成長開始する力学的条件の数値シミュレーションに使いやすそうである。また、脆性とか延性とかをことさら議論しなくともよい点も、違和感を持たれにくい基準となりやすいように思える。

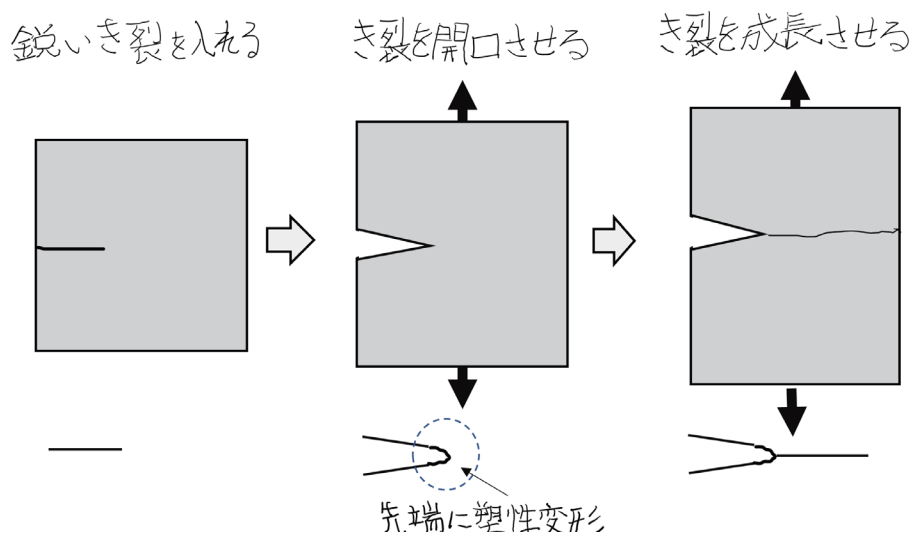
鉄鋼では、予め入れたき裂がそのまま「脆性き裂」として自動的に成長しないことが多い。図表6.04のように多くの場合、き裂の成長に先立って、き裂の開口が観察される。き裂が成長し始める限界の開口量があるというのは、現象的には理解しやすい。

耐き裂性評価は構造体におけるき裂計測技術と結びつくのが良い。き裂の大きさが分かれば、構造体内のき裂の位置に即して、限界の力学的条件を算出できる。より小さなき裂を検出できれば、安全監視がより確実になる。構造物に建造の段階で既にき裂が発生している、または使用段階で気づかずき裂が発生するという前提で、耐き裂性評価を行うとより安全側になる。

6.6 今後の展望

(1) 脆性遷移条件判定法の重要性

鉄鋼で脆性では延性—脆性遷移現象が大事である。大きな犠牲と損失をもたらす構造物の低エネルギー、急速破断を防止することを第一義として、実寸法の構造物における急速破断を抑制できる力学的条件を小型試験法で再現できることが期待される。この点で、シャルピー試験もしくは落重試験は動的試験でもあり有効



図表 6.04 き裂導入、き裂開口、き裂成長（筆者作成）
開口の段階で、き裂先端に塑性変形が生じる

性は今後とも変わらないだろう。

(2) 耐き裂性判定法の展開に大きな期待

耐き裂性判定においては、小型化、簡便化、低コスト化を図り、力学的条件を再現でき、耐き裂性の限界基準を実験的に求めることがますます大事になる。さらに、実構造模擬の大型試験結果、実構造でのき裂実測を結び付け、数値シミュレーションによって実構造の「き裂」管理、耐き裂性を保障するような展開が望まれる。

(3) 脆性論のさらなる発展に期待

グリフィスの脆性理論は、き裂の成長基準を考える基本となっているが、弾性、塑性が共存する鉄鋼での耐き裂性の試験法への適用では、未解決部分を残したままになっている。鉄鋼の脆性を完全に理解するにはさらなる追究が必要である。き裂がない状態からのき裂発生を論じる脆性論の発展も待たれる。

参考・引用文献

- 1) W. C. Unwin, The Testing of Materials of Construction, Longmans Green, London, (1899)
- 2) R. A. Hadfield, Experiments relating to the effect on mechanical and other properties of iron and its alloys produced by liquid air temperature, Journal of the Iron and Steel Institute, 67, (1905), 147-219
- 3) W. Roberts-Austen, An Introduction to the Study of Metallurgy, Charles Griffin, London, (1902), 19
- 4) A. H. Hiorns, Principles of Metallurgy, Macmillan, London, (1914)
- 5) M. G. Charpy, Note sur l'essai des métaux à la flexion par choc de barreaux entaillés, Mémoire et comptes rendus de la Société des ingénieurs civils de France, Juni, (1901) ※この和訳題目「ノッチ付きバーの衝撃曲げによる金属の試験」は1901年9月、ブダペストでの国際試験材料協会で発表された。
- 6) 藤井芳郎, 低温度に於ける金属の帯脆性, 金属の研究, 12, (1935), 189-209
- 7) A. B. Kinzel, W. Crafts and J. Egan, Fine-grained Structural Steels for Low-temperature Pressure-vessel Service, Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 125, (1937), 560-593
- 8) A. A. Griffith, The Phenomena of Rupture and Flow in Solids, Phil. Trans., A, 221 (1920), 163-198
- 9) W. Wiebull, A Statistical Theory of the Strength of Materials, Ingeniörs Etanskaps Akademien, 151, (1939), 1-45
- 10) 室井嘉治馬, 武内武夫, 衝撃試験に於ける衝撃エネルギーの衝撃値に及ぼす影響に就て, 鐵と鋼, 9, (1923), 552-557
- 11) 吉川晴十, 鍊鐵の衝撃抗力に就て, 鐵と鋼, 14, (1928), 228-243
- 12) 室井嘉治馬, 衝撃に對する合金鋼の二三の性質, 其の一, 衝撃屈曲試験に於ける力-變形曲線, 鐵と鋼, 18, (1932), 922-941
- 13) 渡辺三郎, 永澤清, 鋼の低温度脆性及び焼鈍鋼の急冷脆性, 鐵と鋼, 21, (1935), 880-887
- 14) 永澤清, 鋼の低温脆性の原因に就て, 鐵と鋼, 22, (1936), 774-785
- 15) 池島俊雄, 合金鋼の低温脆性に就いて (第1, 2, 3報), 日本金屬學會誌, 8, (1944), 97-106
- 16) 壽時富彌, 低温脆性の機構, 日本金屬學會誌, 9, (1945), 1-3
- 17) 吉川晴十, 脆性に起因する鋼材の破斷に就て, 機械學會誌, 31, (1928), 159-168
- 18) Ryonosuke Yamada, On the Relation between Stress and Strain in the Impact Test, 機械學會誌, 31, (1928), 420-446
- 19) 柏原方勝, 鋼の低温脆性に就て, 日本機械學會論文集, 12, (1947), 115-118
- 20) L. M. カチャノフ, 破壊力学の基礎, (1974), 大橋義夫訳, 森北出版, 東京, (1977)
- 21) 岡村博之, 線形破壊力学入門, 培風館, 東京, (1976)
- 22) 金沢武, 越賀房夫, 脆性破壊=破壊靱性試験, 培風館, 東京, (1977)
- 23) 日本規格協会グループ, JIS Z 2242: 2018 金属材料のシャルピー衝撃試験方法, https://webdesk.jsa.or.jp/books/W11M0090/?bunsyo_id=JIS%20Z%202242:2018, (2022年11月2日閲覧)
- 24) 原子力規格委員会, JEAC 4202-2004 フェライト鋼の落重試験方法, <https://nusc.jp/jeac/4202/jeac4202.html>, (2022年11月2日閲覧)
- 25) 日本規格協会グループ, JIS G 0564: 1999 金属材料—平面ひずみ破壊じん(靱)性試験方法, https://webdesk.jsa.or.jp/books/W11M0090/index/?bunsyo_id=JIS+G+0564%3A1999, (2022年11月2日閲覧)

26) 日本機械学会, 規格基準類とは, 学会基準,
<https://www.jsme.or.jp/std/standards/>, (2022
年 11 月 2 日閲覧)

27) 日本規格協会グループ, WES 1108: 2016 亀裂先
端開口変位(CTOD)試験方法, [https://webdesk.
jsa.or.jp/preview/pre_WES_1108_000_000_
j____2016.pdf](https://webdesk.jsa.or.jp/preview/pre_WES_1108_000_000_j____2016.pdf), (2022 年 11 月 2 日閲覧)

『線形破壊力学』に戸惑う

鉄鋼材料研究者を自負する筆者からすると、材料力学は理路整然としており、そのとおり理解するしかないという圧迫感を感じる人が多い。特に、『線形破壊力学 (fracture mechanics)』においては、前提条件をすんなりと受け入れられない段階で面食らっているのに、突然、論考が先に進んでしまい、ついていけなくなったりすることが多い。

線形破壊力学は、「連続体力学」というより「線形弾性論」として読んでもよいのではないかと思うが、それも、近似仮定を出発点としている。この近似仮定が筆者の躓きの原因となる。

すなわち、扱う材料が弾性体近似できると断った後にすぐに、き裂先端に十分小さい塑性域ができる（そこ以外は弾性変形する）という。こう言われて、戸惑わない材料研究者は少ないだろう。

ところが、実際に、線形破壊力学に基づく材料試験を自分でやってみると、なるほどと頷くのも不思議なところだ。

グリフィスは、鋭いき裂を仮定した（あるかどうかは確かめないで「無いもの」を「ある」と仮定した）。それで試験片のある部分に、「鋭いき裂」を見なせるものをなんとか作ったとしよう。さあ、これにある限界値以上に応力を掛けるとき裂は確かに成長する。だが、簡単に間屋が卸さない。「鋭いき裂」の先端近傍に塑性変形が生じて後、初めてき裂が成長を始めるのだ。これは「鋭いき裂」が十分鋭くないので、「鋭さ」を増すためにさらに仕事が必要なのかと思ったりするが、試験温度が十分脆性となる温度域であって、新しい破面がき裂先端から完全に脆性となると見なせる場合にも、しっかり観察するとどうもき裂先端と脆性破面域の間や脆性破面上にわずかな「塑性変形」の形跡があるので、単純にグリフィスの仮定は実際にはそぐわないと納得する。

Irwin (1948 年)、Orowan (1949 年) は、これらのことを勘案し、グリフィスの表面張力項に、塑性仕事項を加算することを提案した。

驚くべきことに（筆者は心底驚いた）、後者が前者の千倍程度に見積もられるとした。表面張力項が 0.1 % しか占めないとしたら、それは表面張力を考える意味はほぼないのではないかと思った。さらに、初学者からすると、それは「グリフィスキ裂（脆性）」ではなくて、延性き裂とならないのかと心配した。妥協しないと前に進めないのも、まあ元来「グリフィスキ裂」は「実在」しないので、概念としては、「き裂に伴う新しい表面を試験片内部に作るのに必要な仕事」と割り切り、「き裂の成長の力学的クライテリア」をエンジニアリング的に定める方法と割り切ることにした。

慣れ親しんでくるとこの試験によって求めた破壊靱性のバラツキは大きくないことを認める。試験を繰返し、対象材料の種類を拡大していくと、試験法の再現性にも自信がついてくる。

だが、同時に、弾性体としての脆性を計測しようとしているのに、実は材料のもつ塑性を測っているのではないかと疑念がいよいよ高まってくる。実は、この「納得感」と「違和感」の同居は、破壊靱性（き裂を有する材料が破壊に耐えうる力学的環境の上限）の様々な試験法のどれをとっても多かれ少なかれ共通して抱くものである。

破壊力学の大先輩の中にも、破壊靱性も「耐き裂性」と理解し、そう表現すべきだと早くから述べている人たちもいるので、この辺りの違和感は材料研究者に限らないようだ。

7 | 高サイクル疲労

疲労破壊に出逢った頃は、鉄鋼は「弾性材料」と見なされていた。「弾性」であれば破断荷重以下の負荷を永遠に繰返しても可逆的な弾性変形しかしないので、破壊は勿論、変形すら生じないと考えるべきである。実際には引張強さより低い力学条件で疲労破壊する。

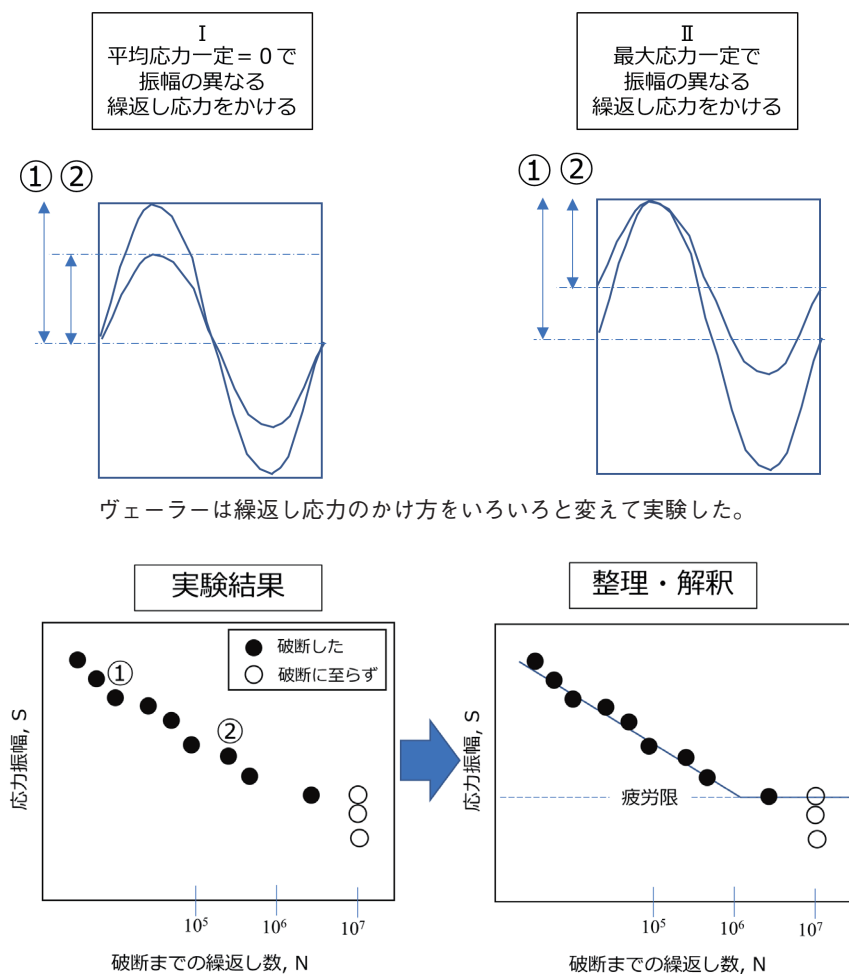
この問題への工学的取り組みが疲労研究の歴史である。長時間使う場合、疲労破壊しない力学条件を知りたいというのが狙いになる。

高サイクル疲労は、負荷パターンの繰返し回数を数えるという意味で時間依存型の材料負荷によって生じる破損である。負荷が材料内部に蓄積もしくは作用し、き裂が発生し、成長、破損に至ると整理されてきた。負荷が蓄積しない負荷パターンがあるのか、蓄積してもき裂が発生しないのか、き裂が発生しても成長しないのか…などと考えながら読んでいただきたい。

7.1 金属疲労との闘いの始まり

金属が繰返し応力を受けると静的破断荷重よりはるかに小さい荷重で破断することを現場技術者達は早くから知っていたようだ。鉄道建設が進むにつれ、機関車の車軸の疲労問題が非常に重要になった。例えば、7万 km 走行すると鉄道の車軸の断面急変部、特に鋭い凹角部に小さなき裂が現われる傾向があるので、7万 km 走ったら車軸を注意深く調べるように勧めていたという。

外観は良好な車軸が何年か使用の後予期せず破損するのは、鍛鉄の繊維組織がしだいに結晶構造状態になるからだと説明されていた。だが現場の技師たちはこの理論に同意できなかった。例えば長く使った軸を観察しても金属の内部構造には変化はなかった。むしろ



図表 7.01 S (応力振幅) - N (破断までの繰返し数) 曲線。
かつてはヴェーラー線図と呼ばれた。(筆者作成)

車軸の形状が決定的という気づきが生まれていたようだが、繊維性から結晶性への遷移説も根強く残った。この問題は19世紀後半から各国の機械学会での主要な議論テーマになった。この頃までは弾性変形の理解は深まっていたが、「塑性変形」はよく理解されていなかった。

このような中で、金属疲労に関する材料力学を大きく前進させたヴェーラー、バウシンガーなどが現れる(以上は、主に3章の参考・引用文献1に基づく)。

7.1.1 ヴェーラー(A. Wöhler, 1819年~1914年、ドイツ フランクフルト)

ヴェーラーはプロシアのハノーバー州で学校長の家に生まれ、ハノーバー工科大学を卒業後、汽車会社で鉄道建設の実地訓練を受けた。1843年に汽車製造の研究のためにベルギーに派遣された。帰国後、鉄道関係の機械工場を任され、1847年には車両と機械の工場を担当して、それから23年間フランクフルトに留まり、金属の疲労強さの研究に取り組んだ。

材料の信頼性向上を考える際の出発点であり最重要点は、実験結果が正確でありかつ再現性が得られる試験法を持つことである。実物実験は大掛かりで大変である。同じ設計図から全く同じ実物ができるかの確証もない。それに対して、なるべく寸法の小さい試験片に模擬負荷を与えることで実物での結果を再現できる試験法があると良い。さらにその試験法が理論的にも実用的に信頼性が十分に高く、経験の蓄積で正当性を高めていくのが望まれる。改良が加わることで益々信頼性が向上していくものでなければ試験法は生き残れない。ヴェーラーはこの点で最初に成功した材料力学研究者だと思う。

彼の業績は広範囲に及ぶが、今でも「ヴェーラー線図」として記憶されている図に基本業績は凝集されている。SはStress amplitude(応力振幅)、NはNumber of cycles to failure(破断までの繰返し数)の頭文字をとって、現在はS-N曲線と呼ばれている(図表7.01)。この整理はなぜ破損するのかという原理は分からなくても、疲労での耐破損性の工学的な判断に使える。

この図でのY軸は応力ではなく応力振幅(最大応力と最小応力の差の半分)である。実験(I)では、平均応力を一定(=0)として応力振幅を変化させた。そうすると応力振幅が大きくなるにつれて破断までの繰返し数が減少した。実験(II)では、最大応力を一定にして応力振幅を変化させたら、応力振幅と破断までの繰返し数の関係は実験(I)の結果に重なった。

実験は回転曲げ方式で行ったが、彼はさらにねじり方式、軸力方式の実験も行い、図表7.01の整理をすればすべての実験データが一本に集約されることを確認した。ここからS-N曲線の整理が生まれた。

S-N曲線では、X軸の破断までの繰返し数は対数で表さなければならないほどの広い範囲となる。10⁶回(百万回)回りで破断しない領域に入ることも経験的に知られた。彼はこれを耐久限度(endurance limit)とした(現在では疲労限界、疲労限(fatigue limit)と呼ばれることが多い)。

限られた時間内でこれだけの繰返し数を稼ぐには、回転速度をできるだけ速くしながら一定の繰返し応力を維持しなくてはならない。この点でも納得できる試験機をヴェーラーは開発できていた。ヴェーラーの凄さが分かる。

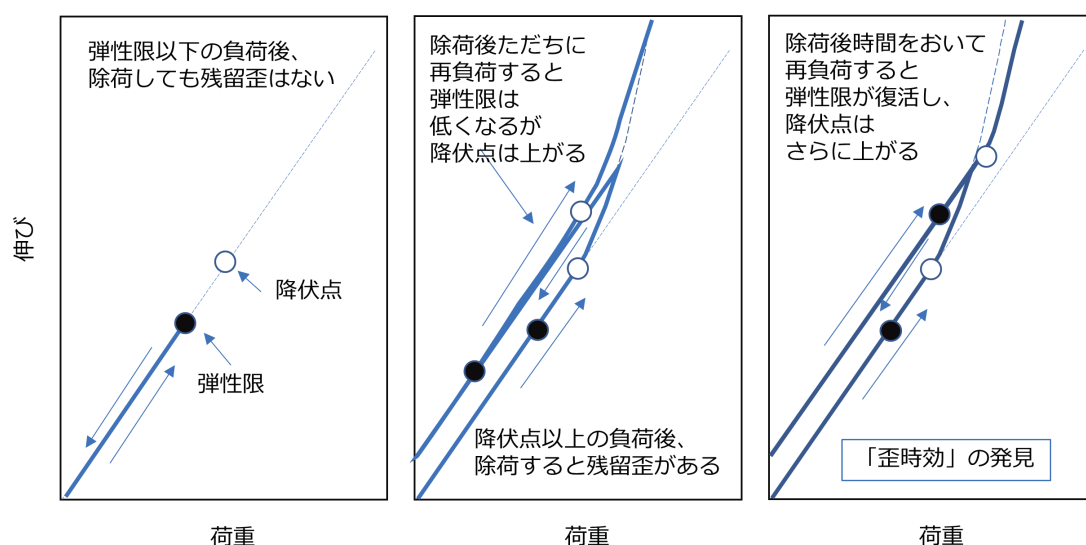
しかしながら時間と経費をできるだけ節約したい。そこで、ヴェーラーは疲労限と静的な力学的性質との関係を見出そうとした。この完全解は今でも得られていない。それでもヴェーラーが提案した「許容応力(working stress)」は大発明と言える。彼は、許容応力を一様引張応力の場合は引張強さの1/2、繰返し応力の場合は疲労限の1/2とすることを提案した。安全率で言えば2である。安全率という考え方に確たる根拠がある訳でないが、設計上の指針としては定着している。ヴェーラーは引張強さを基準に置いた。何を基準と置くかも後年の研究課題となっていく。

S-N曲線を使う中でヴェーラー自身が極めて重要な示唆を得ている。構造物、機械では、最大応力が同程度に大きい箇所でも、両振り繰返し応力の振幅が小さいところは金属疲労の心配が低くなる。両振り繰返し応力がかかり、応力振幅が相対的に大きくなる機械部品では、金属疲労が大事になると見抜いた。橋梁桁やレールでの金属疲労は勿論だが、機械部品での金属疲労に注意を向かせるきっかけになった。

このように、金属疲労の科学研究の扉を開いたヴェーラーの貢献は大きい。彼は必要な試験機と測定器をすべて自ら試作した。力と変形を精度よく測るために厳しい設計条件をつけたので、彼の試験機は金属材料の試験方法全般にも大きな進歩をもたらした。これも引き継ぐべき重要な教訓である。

7.1.2 ヨハン・バウシンガー(Johann Bauschinger, 1834年~1893年、ドイツ ミュンヘン)

バウシンガーは、ニュルンベルクで職人の家庭に生まれ、ニュルンベルク商業学校と工科大学で教育を受けた。ミュンヘン大学に進学できて、数学と物理学を



図表 7.02 降伏点、歪時効の発見（筆者作成）

学んだ後、1857年フィアースの商業学校の教師になった。その後、1868年以降亡くなるまで、ミュンヘン工科大学の Engineering Mechanics 教授を務めた。材料力学におけるバウシinger効果（以下に紹介する）は、彼にちなんで名付けられた。

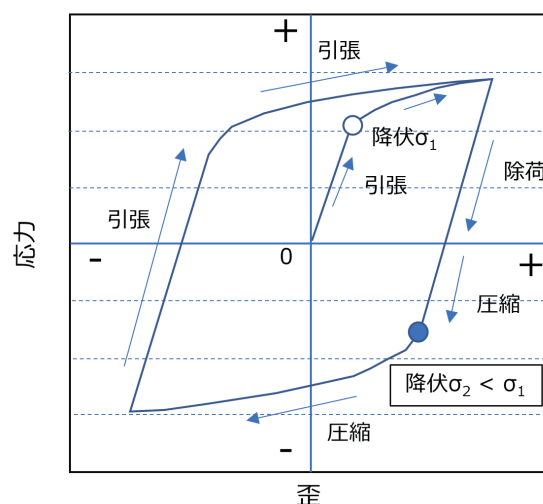
彼は、ミュンヘン工科大学の機械試験機の責任者であり、徹底的に精緻で精度の高い実験に拘った。弾性歪を精密に測定するために、歪の精度が 1×10^{-6} の鏡式伸び計を発明した。これを使って、純鉄および軟鋼の引張試験を行い、ある限界まで伸びが荷重に比例して増加し、除荷しても残留歪がないことに気づいた。これから、鉄あるいは鋼の弾性限（elastic limit）は比例限（proportional limit）と一致するとした（※現在ではこれは正しいとは言えない。より正確に言えば、比例限<弾性限である）。

さらに図表 7.02 のように、弾性限以上に荷重を増加させていくと、伸びは荷重より速い割合で増加し始め、ある荷重で急に変形が増加し、この荷重を一定に保っておけば時間とともに変形はたえず増加を続けた。この荷重を降伏点（yield point）とした。軟鋼の降伏点は、降伏点以上に荷重を加えて一端除荷した後に、すぐに再負荷すると弾性限は低くなるが、降伏点は増加する。除荷後、何日か置いて再負荷すると、弾性は回復し、弾性限、降伏点とも増加した。これは後世、「歪時効」と名付けられる現象の最初の観察である（※現在では、降伏点以上の変形で導入された格子欠陥が炭素原子と結びついて生じる現象とされている）。

バウシingerは軟鋼に繰返し負荷をかけたとき、弾性限以上に引張変形した試験片を圧縮変形すると、そ

の際の弾性限が引張変形の際のそれより低下することを見つけた（バウシinger効果、図表 7.03）。低下した弾性限を圧縮変形で増やすことができるが、圧縮力がある限界を越えると、今度は引張変形の際の弾性限が低下する。試験片に何サイクルかの荷重を加えると、荷重範囲内での引張—圧縮で完全弾性を示すようになる。バウシingerはこれを引張および圧縮の自然（natural）弾性限とよんだ。そして、初期（initial）弾性限は製造工程によるが、自然弾性限は“真”の物理的特性を示すものと考えた。試験片が自然弾性限内にあるかぎり、無限の繰返し荷重に耐えられ、疲労破壊はないと断言した。

バウシingerの断言の重要な意味は、金属疲労は弾性変形内では生じない、弾性変形を越えて起こる、ということである。自然な発想とも言える。このようにバウシingerは、弾性変形の研究を深めて、後年、「塑



図表 7.03 バウシinger効果の説明例（筆者作成）

性変形」と呼ばれる変形現象に大きく足を踏み入れた研究者である。バウシingerも極めて精密な測定に心を砕き、自ら測定道具を開発したことを特筆しておきたい（※弾性ヒステリシスまでには踏み込んだと言えない点にはご留意いただきたい）。

7.1.3 機械部品の金属疲労

機械工業の発展にともない、使用中の機械的破損の主要な原因となる、機械部品の疲労が20世紀における材料試験所の最も重要な研究分野の一つとなっていく。

疲労限と静的試験で求めうる他の機械的特性との間の関係については、両振り繰返し応力を受ける鉄鋼の疲労限は、近似的に、 $(0.40 \sim 0.55) \times$ 引張強さとなることがほぼ一般的に見られるようになった。

バウシingerが示したヒステリシスと疲労との関係も調べられた。繰返し応力によって比例限は一定値に近づく。この限界が疲労の安全範囲を決めるだろうと思われた。ヒステリシスの幅が繰返し応力の最大値とほぼ直線関係になった。この直線の応力軸切片が応力の安全上限を決めるとされ、それが疲労限と関連付けられた。

1903年にユーイング (J. A. Ewing) とハンフリー (J. C. W. Humfrey)¹⁾ が繰返し変形によって試験片表面にすべり帯ができることを初めて報告した。彼らはスウェーデン鋼試験片の表面をよく磨いて、繰返し応力を加えながら表面を顕微鏡で観察した。すると応力

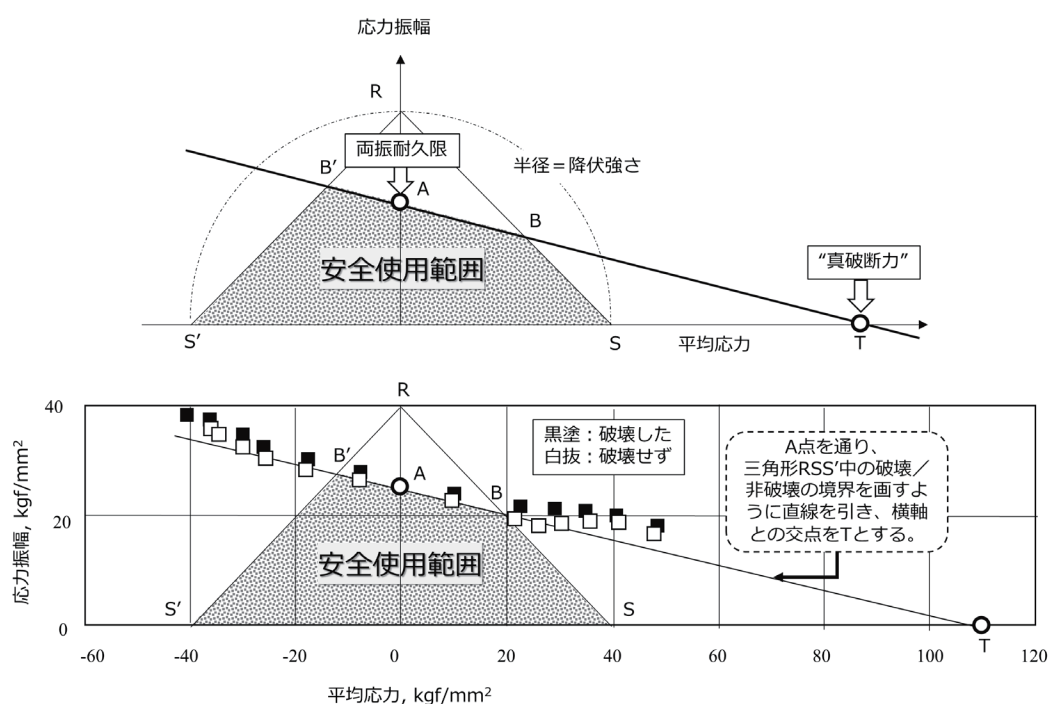
がある閾値以上となるいくつかの結晶の表面に直線的なすべり帯 (slip bands) が現われた。すべり帯は繰返しが進むにつれて広がるように見え、終にはすべり帯のひとつからき裂が発生した。ハンフリーによるすべり帯の観察は、金属結晶の塑性変形モデルと合致しており、疲労現象が塑性変形と不可分なことも物語っている。この観察が、疲労破壊のき裂が表面にまず生じ、それが内部に広がっていき、最終的な破断に至るという考え方を定着させていく。

ほとんどの疲労き裂は応力集中点から始まるという知見は苦い経験から得られた。応力集中は機械部品の隅部、みぞ、孔、キーみぞなどに生じる。これは幾何学的には必然なので、現場的には応力集中を減らす工夫が常識的処置となった。

7.2 戦前の足跡

【機械学会】

疲労に関する報告数は極めて多い。会誌には、試験機の開発と試験法の詳細に関する検討が多い。試験機の開発については、欧米からの輸入の他に、松村式繰返し打撃試験機 (松村鶴造、京都帝国大学)、小野式回転曲げ疲労試験機 (小野鑑正、1911年九州帝国大学、1936年東京帝国大学)、西原式引張圧縮疲労試験機 (西原利夫、京都帝国大学) など大学教授の苗字を冠した



試験機が多いのが面白い。それ以外にも試験機の開発報告や、海外製の試験機（ヘー式、シェンク式など）の紹介も多い。

論文集5巻（1939年）に、西原利夫（京都帝国大学）らによる「耐久力線図」²⁾（図表7.04 現在では「疲労限度線図」と呼ばれるものの原形）が示されている。これは横軸に平均応力、縦軸に応力振幅を置き、この図の中に、両振耐久限A、降伏強さR_SS'と置く。もし真の破断応力Tが与えられれば、AとTを結ぶ直線を引き、三角形RSS'の辺との交点をB、B'を得る。そうすると多角形B'BSS'で囲まれた領域が「安全使用範囲」になる。実験的には下の図のように諸条件で疲労破壊の有無を調べ、「安全使用範囲」内での境界とA点を通る直線を引き、横軸との交点をTとする。

【鉄と鋼】

12巻（1926年）に、藤井寛（日本製鋼所）は、疲労した材料はどうすればその損傷を回復できるかという関心から検討した結果³⁾を報告している。損傷は焼もどし処理で回復できるとしている。

14巻（1928年）に、松下徳治郎、永澤清、小松桂之助（日本特殊鋼）が、種々の鉄鋼の焼もどし温度と疲労寿命の関係⁴⁾を調べている。

18巻（1930年）に、高瀬孝次（陸軍航空技術研究所）が、航空機発動機部品に使われる種々の鉄鋼について、特に焼もどし温度による疲労寿命、衝撃値などの変化を極めて詳細に報告⁵⁾している。「繰返し打撃エネルギーと破断回数」の関係図を示していることに注目した。本稿で紹介する戦前の学術誌には、いわゆるヴェーラー曲線は見当たらない。戦前疲労試験に使われたのは、松村式繰返し打撃試験機という名称が表すように、設定された打撃エネルギーが繰返し試験片に負荷される方式で、試験片にかかっていた応力、応力振幅の一定性が保証できない方式のものだったことが背景にある。

19巻（1933年）には、大阪工業大学に移った藤井寛が小林幸一と連名で、疲労き裂の起源に関する微視的なモデル⁶⁾を論じている。

『応力の繰返しによってまずすべり面を生じ、試料の表面、結晶粒界、鋳滓、気泡など材質の均等でない場所では凸凹がだんだん甚だしくなる。空隙がますます大きくなって、ある程度以上の応力の下ではそれが初期き裂となって、終に決定的き裂となる。（筆者：現代語に直している）』という考察は、そのモデルが十分ではないとしても現在も通じる。

20巻（1934年）に、玉置正一（日本特殊鋼）は、

海外の報告にもあまり見られないとして、ノッチの形状、屈曲部の曲率半径の違いが、破断寿命に大きな影響を及ぼす⁷⁾ことを示し、単にノッチの有無を示すのでは不十分で、ノッチの形状、大きさなどを明確に示さないと相互比較はできないことを訴えている。

「鉄と鋼」ではこれ以降、疲労に触れた報告は見当たらない。しかし、次に紹介する「日本金属学会誌」には、それに続くようにほぼ毎巻、疲労に関する報告が掲載されている。

【日本金属学会誌】

1巻（1937年）には、高橋越二、鹽谷喜久男（住友金属工業）が、螺旋発条の繰返し圧縮を行う実験装置を開発⁸⁾したことを報告している。工学的方法で負荷応力の時間変化を求めたことは注目に値する。変動応力となっていることが明らかである。

4巻（1940年）～5巻（1941年）に、大柴文雄（米沢高等工業学校）が5回にわたって『金属の疲労』を解説⁹⁾している。ヴェーラー線図の紹介を基礎にしている。詳細内容は、欧米での先端研究を参考にしたもので、日本では1930年以降機械学会で報告された研究成果を紹介している。この辺りで、知見としては欧米に追い付いていたものと見える。

6巻（1942年）に、市原通敏、石原康正、稲垣耕司（東北帝国大学）、今野豊昌（日立兵器）が、疲労試験において生じる疲労変形¹⁰⁾を詳細に検討している。注目すべきは、試験片に係る応力、応力幅を一定に保つ機構を設計したことである。（この調査の限りにおいて、日本での）このような機構の初めて報告となる。

佐藤忠雄（海軍航空技術研究所）が、対象が超ジュラルミンだが、シェンク式繰返し曲げ疲労試験機（負荷応力、応力範囲を一定に保つことができる形式）で、重複荷重の影響を求めている。設計の参考値として信頼性の高い試験手法が共有されてきていることが窺われる。

7巻（1943年）では、神戸製鋼所に移った大柴文雄が、松村式試験機で炭素鋼のノッチ加工試験片を用い、ノッチ底の側面での疲労き裂の発生と進展¹¹⁾を観察している。同様に砂時計型試験片を用い、小野式疲労試験機で同様の試みをしている。

8巻（1944年）および9巻（1945年）には、津田覚（中央航空研究所）が、X線回折装置を疲労過程の観察に利用¹²⁾しようとした報告がある。その続報が、11巻（1947年）に2報見られる。いずれも物性論的な視点である。

9巻（1945年）には、石田制一（海軍技術研究所）

が異なった試験機を用いて疲労結果を比較した報告¹³⁾がある。ヘー式引張圧縮、小野式回転曲げ、シェンク式回転曲げ、アプトンルイス型の4種類を比較使用している。いずれもきちんと調整すれば性能通りの使い方はできるとしているが、得られる試験結果において試験機間の比較に問題があったことが窺える。

13巻(1949年)には、川田雄一(東北大学)による表面仕上げが疲労限に及ぼす影響、軸に直角方向にあけた孔の疲労限への影響を調べた2報¹⁴⁾がある。小野式試験機を用い、ヴェーラー曲線を描いて比較している。表面仕上げでは、サンドブラスト>エメリー仕上げ>旋盤加工ままという現在では常識となったことが示されている。

このように、海外の文献から総合的に知見が紹介され、効率的に取りこまれている。しかし、当時の試験機は応力、応力振幅の精度よい制御に難があったようだ。1940年以降欧米でのこの点での知見も正しく理解され、データ整理もいわゆるヴェーラー曲線を基礎とするように急速に進んだ。一方、疲労き裂の発生、発展の観測とその原理的説明に鋭い視点が見られるのは日本に特徴的な一面のように思われる。

7.3 戦後、まず試験法の統一に向けて

「材料試験」第3巻(1954年)第13号に「疲労試験機」というタイトルの疲労部門委員会による総説¹⁵⁾がある。(「材料試験」誌は、1952年創刊の材料学会発行の学術誌で、1963年に「材料」と名称変更している。)これからいくつかの点を読み取れる。

- 多種多様な疲労試験機を分類している

応力(平面曲げ、回転曲げ、引張圧縮、ねじり、組合せ)、駆動方式(クランク、回転、遠心力、電磁力、油圧、圧縮空気)、共振性(非共振型、準共振型、共振型)などに分類しているが、特に「荷重一定型」か「変形一定型」という制御方式に注目している。

疲労試験の経過中に微小なき裂が発生すれば、荷重制御型では変形量が増大し、比較的速やかに破断に至ると考えられるが、変形制御型では荷重が低下し、き裂の成長が緩やかになる恐れがあるので、「なるべく荷重一定型が望ましい」としている。

- それぞれのタイプの試験機について客観的に講評している

回転曲げ疲労試験機、平面曲げ疲労試験機、引張圧縮疲労試験機、ねじり疲労試験機、組合せ応力

疲労試験機、衝撃疲労試験機について述べている。それぞれの得失を整理している。衝撃疲労試験機は、応力の測定と一定制御が困難で、繰返し速度に上限があるなどの欠点から使用例が減っていることに言及している。

これほどの多様多種の試験機が使われているとすると一般的に言って、基準値を得ること自体が難しく、相互比較する客観的根拠を得ることも難しい。一方、疲労の性質を明らかにする要求はいっそう高まっていく。

「材料」第12巻(1962年)第115号掲載の報告「日本材料学会疲労試験方法規格および同規格解説について」¹⁶⁾は、日本材料学会疲労部門委員会が、1962年に「工業技術院より日本材料学会に疲労試験方法のJIS規格原案作成が委託され」ており、その原案が「日本材料学会規格」を母体としていることを紹介している。「日本材料学会規格」の作成の際に、ドイツ、イギリスの関係規格を参考にしようとしたが、一般的な解説の域を出ないもので試験法規格としての十分な参考例とはならなかったので、独自の成案を得るために審議、試験を繰返した苦勞も述べている。以後、疲労試験法に係るJIS規格の制定、改正、見直しなどには日本材料学会が積極的に関与している。

疲労試験法のJIS規格が成立したのは1974年となったが、その後、広く定着している。

7.4 金材技研「疲れデータシート」事業¹⁷⁾

金属材料技術研究所では、1969年度以降4ヶ年計画で疲れ試験関係の整備に着手し、1972年度に完成をみた。完成時の規模は、人員28名、疲れ試験機73台、建物延面積2100㎡となり、1974年度に疲れに関する受託研究が開始され、1975年3月には疲れデータシート作成に関する「金材技研疲れデータシート懇談会」が組織された。そこで、審議されまとめられた「国産実用金属材料の疲れデータシート作成計画」は、骨格は「クリープデータシート」(後述)のそれを踏襲したものとなった。

大きな目標は、疲れ強さに影響を及ぼす、金属学的因子、形状寸法因子、環境条件など多くの因子の作用を解きほぐしていくことにあったと類推される。ところが、既に各所で取得、蓄積されていた膨大なデータからそのような知見を導き出すことができなかった。そこで、試験材料を国内の代表的な企業における通常の製品の内から新しく採取し、標準試験法に基づいた疲れ試験を行い、データ整理までを一貫して金材技研

で実施して、すべての関係者が共通基盤として共有できる「試験データ」をまず得ることとした。

具体的には3つのサブテーマが設定された。すなわち、「ばらつきを含めた基準的疲れ特性」、「溶接継手の疲れ特性」、「高温疲れ特性」である。それぞれに対応した分科会が組織された。材料採取、溶接、各種試験や測定などの方法については各分科会が詳細に検討した。

データシートの作成は以下の JIS 規格に違った。Z 2273 及び Z 2274 は、1974 年に制定されたばかりのものである。

- JIS Z 2273「金属材料の疲れ試験方法通則」
- JIS Z 2274「金属材料の回転曲げ疲れ試験方法」
- JIS Z 3103「溶接部の引張疲れ試験方法」
- JIS Z 2241「金属材料の引張試験方法」
- JIS G 0567「鉄鋼材料の高温引張試験方法」

などである。

各サブテーマの計画概要は以下のようである。

- (1) ばらつきを含めた基準的疲れ強さのデータシート
JIS 規格の機械構造用鋼について、材料規格の範囲に対応したばらつきを含め、基準的な疲れ特性を求める。
- (2) 溶接継手の疲れ強さのデータシート
実用条件内の各種溶接法により作られた溶接継手の疲れ特性を、余盛形状に注目しつつ求める。
- (3) 高温疲れ強さのデータシート
対象材種に関する使用の実状に応じ、高温における高サイクル範囲または低サイクル範囲、あるいは両範囲の疲れ特性を求める。

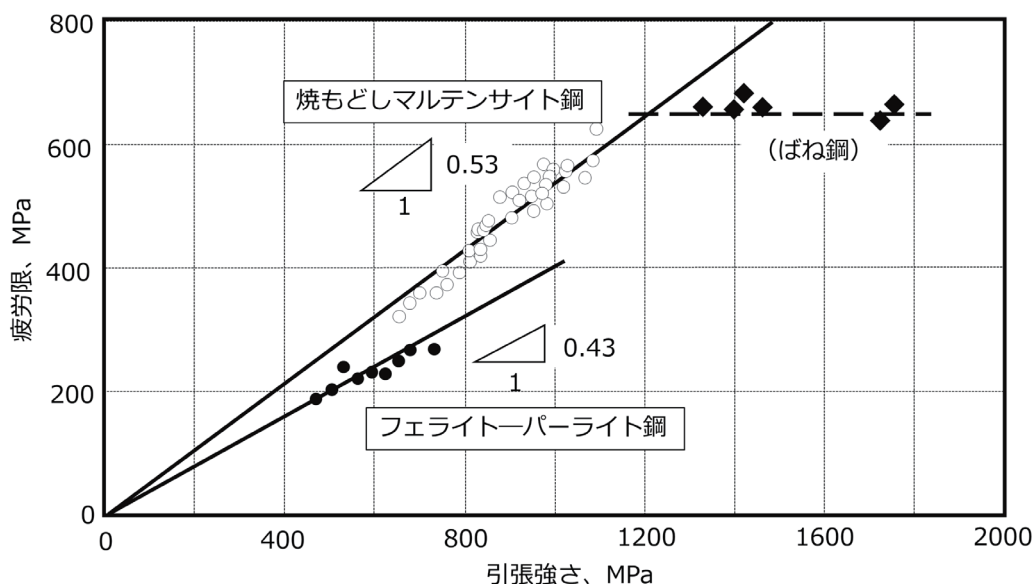
「試験データ」を計画的に取得することと疲労に関する基礎研究、例えば、統計的疲れ試験及び解析法の研究、疲れにおける切欠感受性及びき裂伝ば挙動の研究、突合せ溶接継手の疲れ特性の研究、組合せ荷重下の疲れ特性の研究、繰返し応力歪挙動の研究、疲れ破壊のフラクトグラフィ的研究、クリープ疲れ相互作用も含めた高温疲れ特性の研究などを結合して進めることで、得られる成果をより豊かにする姿勢を宣言して始まった。

金材技研疲れデータシート事業は、いったん「終了」し、その後「再開」されている。これらのいきさつを当事者ができる限り客観的に記述したものに、古谷(2011年)¹⁸⁾、Furuya ら(2019年)¹⁹⁾が挙げられる。本稿ではこの二つの文献を参考に、サブテーマ1に絞って照準を当てて、紹介する。

7.4.1 前期の疲労データシート(1974年～1995年)

計 85 冊の疲労データシートが出版された。100 台近い疲労試験機(回転曲げ、ねじり、軸荷重、さらに歪制御試験も始めた)による試験データをまとめて公表した他に類例のない分量の試験データベースである。国産実用金属材料の疲労特性基準データとなる。解説書である「データシート資料」も 18 冊出版された。同じ試験条件で行ったので、試験法の違いによるばらつきがない。同じ規格で相当数のサンプリング(10 程度)を行ったので、試験片準備条件の偏りが無い。

その上で、以下のような貴重な知見が得られた(図表 7.05)。



図表 7.05 引張強さと疲労限の関係
(文献 18 を参考に筆者が作成)

- 当初、リンや硫黄などの不純物の影響をみるために製造番号の異なるサンプリングを意図的に行ったが、試験の結果、疲労限に不純物の影響がないことが明らかになった。疲労限の支配因子が第一には静的な強度であることが示された。
- さらに、第二の因子として、金属組織の種類の違いの影響が明白になった。
- また、データシートには、引張特性、硬さ、衝撃特性なども併記してあるため、データベースの解析によって、疲労限－延性バランス、疲労限－耐き裂性バランスなども解析できる。

※後日、より高強度のばね鋼の結果が加わり、図表 7.05 に描き込んだように、引張強さ 1 200 MPa 以上のばね鋼の疲労限が、引張強さに依らない一定値となり、材料強度上昇の効果が得られない結果となっている。これはこれで貴重な安全指針を与えているし、使える高強度の向上のための課題も示している。

7.4.2 後期の疲労データシート（1997 年以降）

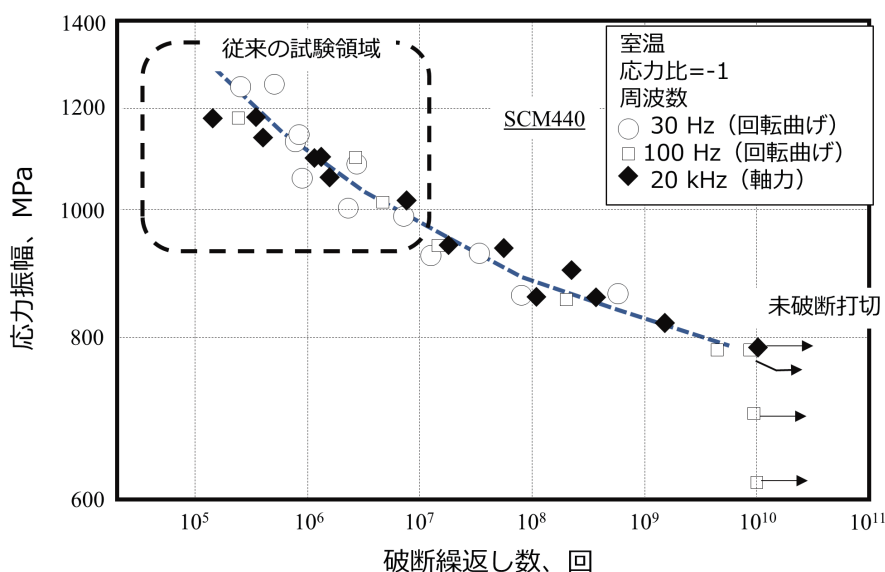
前期は基本的には当初の計画を完遂して終了した。いったん、「冷却期間」を置き、人員、投入できる予算などの減少を十分認識したが、本事業の貴重さをなるべく継承すべく、従来のサブテーマを堅持しながら、打ち切り繰返し数を一桁から二桁延長することを目指して継続することにした。基準疲労では 10^8 回を 10^{10} 回へ、溶接継手疲労では 10^7 回を 10^8 回へ、高温疲労では、 10^4 回を 10^6 回へ延長した。この計画変更後も順調に疲労データシートを出版している。

長期疲労に着目したのは、様々な用途でより長期での使用が求められるようになったこともあるが、疲労限が 10^6 回～ 10^7 回で現れるという「常識」が必ずしも成り立たず、ばね鋼等の高強度鋼では 10^8 回でも疲労限に達しないという事例が多く認識されるようになっていたことなどが背景にある。疲労限の有無の確証は実験でしか得られない。

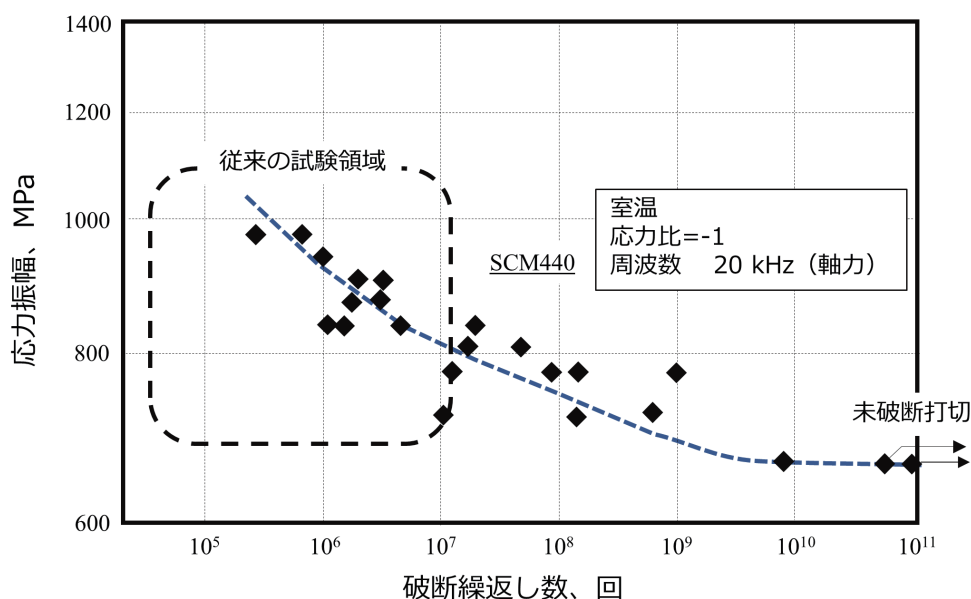
長期疲労に挑戦するためには、試験の「加速」なしに試験研究体制を維持するのは難しい。そこで、ひとつはマルチ回転曲げ試験機の積極的な活用により、一本の S-N 曲線の取得に費やすべき総時間を増やさないように計画実施することにした。さらに、試験周波数を大幅に増加させるために超高速超音波疲労試験法を開発した。これらは従来方法による試験結果と比較して十分な再現性が確保できるかの検証を十分におこなって進めた。超音波疲労では、試験片の温度上昇の有効な抑制が肝要なことも明らかにし、20 kHz を実現した（図表 7.06）。

破断繰返し数を四桁近く増やしたこの図表 7.06 はいくつかの重要なことを教えている。一つは、試験周波数を 30 Hz、100 Hz、20 kHz と変えても一つの S-N 曲線となり、周波数依存性はなく、20 kHz 試験が妥当であることを立証している。さらに、高強度鋼では確かに 10^{10} 回に至っても「疲労限」に明白に達しているとは言えないのでさらなる継続が必要となる。

Furuya はその後、同種の鉄鋼で、 10^{11} 回までの超音波疲労試験を実施²⁰⁾した（図表 7.07）。図表 7.06 の試験材料より材料強度が低めのものだが、 10^{10} 回回りまでは「疲労限」が見えない点は再現されている。応



図表 7.06 SCM440 鋼の S-N 曲線における周波数の影響
(文献 19 を参考に筆者が作成)



図表 7.07 SCM440 鋼の 10^{11} 回までの S-N 曲線
(文献 20 を参考に筆者が作成)

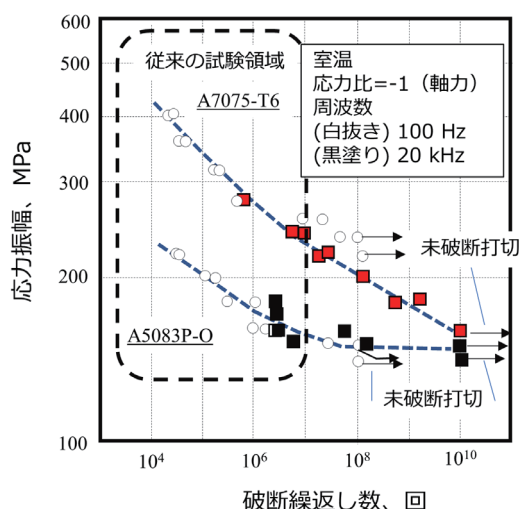
力振幅 640 MPa で 10^{11} 回を目指す 4 本の試験を実施し、1 点は 10^{10} 回直前で破断、 10^{11} 回で未破断停止が 2 点、 10^{11} 回直前での試験停止が 1 点となった。これらを総合し、従来の判定法によると 640 MPa で「疲労限」に達したと見ることができる。Furuya は疲労き裂の発生と進展に関する詳細な検討も同時に行い、この「疲労限」では微細第二相周辺にき裂発生が認められるも、それが進展せず、破断には至らない条件であることを解析によって示している。

これらは実験的に確定された新しい知見だが、 10^{10} 回～ 10^{11} 回まで延長した S-N 曲線は、実用上の意義は勿論、今後、高サイクル領域での疲労破壊のメカニ

ズム解明に極めて大きな影響を与えるはずである。

この 10^{10} 回～ 10^{11} 回まで延長した S-N 曲線取得の威力をさらに雄弁に物語るのは図表 7.08 である。従来の知見ではアルミニウム合金には「疲労限」が現れないとされていたが、いくつかのアルミニウム合金で 10^{10} 回までの S-N 曲線を求めたところ、A5083P-O では 10^7 回回りで「疲労限」に達してるように見えるが、A7075-T6 合金では 10^{10} 回に至っても「疲労限」に達していないように見える（ここでも周波数依存性がないことを立証している）。

疲労破壊に強い材料設計については、経験的に様々な知見が述べられているが、以上のような新しい知見を鑑みれば、それらの原理的合理的説明については従来のものが完全ではないと言わざるを得ない。今後は、検討する合金種を拡大することによって、 10^{10} 回～ 10^{11} 回までのもしくはそれ以上の繰返し数領域での疲労破壊メカニズムを総合的にかつ合理的に説明できるようになっていくことが期待される。



図表 7.08 アルミニウム合金の 10^{10} 回までの S-N 曲線
(文献 19 を参考に筆者が作成)

7.5 関連学会による疲労データベースと疲労設計指針

「NIMS 疲労データシート (当初は金材技研疲れデータシート)」は、あくまでも試験データをありのままにまとめたものであり、そのデータの解釈や実際問題への適用の仕方などについては、一切述べていない。NIMS の研究者が、学術誌に自らのデータ「解釈」などを発表することはあっても、その「解釈」には「公

的な位置づけ」は全くない形としている。したがって、予備知識のない一般需要家にとっては、明らかな壁がある。

そのような事情もあり、関連学協会では、独自に主に学術誌等に公表された疲労データを収集してデータベース化したり、それらを「疲労設計」に活かすための指南書となる書籍等を取りまとめて公表したりしている。本稿と関連深いものを以下に紹介する。それらには基本、有償のものが多く。

日本材料学会

「'96年版金属材料疲労強度データ集」(1996年、図書)
「'96年版金属材料疲労強度データベース」(1996年、電子媒体)
「WEB版疲労データベースシステム」(2013年、会員向)²¹⁾
「金属材料疲労強度データベース」と「S-N曲線回帰ソフトウェア」を統合したシステム。Web上のデータベースに320材料2997種類(うち鉄系材料233材料2631種類)の疲労データが収録されており、今後順次追加される予定。このシステムでは、試験条件や材料物性などをもとにした疲労データの検索、疲労データのグラフ表示、S-N曲線の回帰式の計算などが可能。

鋼構造協会

「鋼構造物の疲労設計指針・同解説
—付・設計例—2012年改定版」(2012年、図書)
1993年版の指針を全面的に見直し、より合理的な疲労設計のための有用な知見を盛り込んで改定。近年主流になった鋼構造物のCO₂溶接等の疲労試験データを収集・整理して加え、新たなデータベースを作成した。各溶接継手の疲労強度等級の検討に役立つ。

溶接学会

IIW「溶接構造の疲労設計」の翻訳(1999年、図書)
教本「溶接構造の疲労」の編纂(2015年、図書)
構造物の安全性と長寿命化を意識した基礎から最新の知見および関連知識を網羅する教科書。疲労の歴史、疲労損傷事例、材料力学、溶接の基礎知識、疲労強度改善法、疲労損傷モニタリングなどをまとめている。

本四公団(1970年~2005年)

本州四国連絡橋公団では実物大に近い試験体を用

いた疲労試験を行うため、世界で最大規模の大型疲労試験機²²⁾を製作し、数多くの大型疲労試験を実施してきた。設備の一部は、施工技術総合研究所疲労試験研究センターに移管されている。

7.6 今後の展望

以上に基づく今後の展望は以下ようになる。

(1) 超音波疲労試験法の国際標準化への期待

超音波疲労試験法は日本溶接協会規格²³⁾²⁴⁾として制定された。これを今後、世界に広げていくことを期待する。この方法が国際的に普及、定着すると比較的 low コストで破断寿命が10¹⁰回を超える高サイクル疲労試験が様々な国の様々な機関で実施可能となることが想定される。そうなると、世界的に10¹⁰回を超える高サイクル疲労データが通常になり、その成果発表が活発化すると思われる。

疲労破壊のメカニズムについては依然として明快になったとは思えない。引張強さ1200MPa級以上では疲労限(10⁶回~10⁷回までの判定)が必ずしも静的強度増加に沿わない実験事実があるので、1200MPa級以上の使用が避けられている。今後10¹⁰回を超える高サイクル領域までの実験データが蓄積すると、新しい安全基準としてまとめられる時が来ると期待される。この点については、弾性歪振幅(弾性ヒステリシス)との関係での考え方の整理も進むことを期待する。

(2) ひとつの試験機関をプラットフォームとして実施する意義の再確認

実用材料の疲労データが単一の試験機関で同じ試験法で実施される意義は大きい。これまでに、長年の疑問だった、疲労限をどの因子が決めるのかという基本的テーマでは、第一義的に引張強さ、硬さの関数であり、第二義的に金属組織によってその関係は左右されるということがプラットフォーム参加者は勿論、その枠を超えて納得された。また、繰返し数を10¹⁰回まで伸ばすことにより、高強度材料の疲労限があるのかないのかの決着に近づいていることも共有成果となる。これらの知見は、機器の安全基準の設計、判定の基礎となるばかりか、高サイクル疲労での変形と破壊のメカニズムの解明にも貢献することは明らかである。

(3) オールジャパン体制の継続

超音波疲労試験機の普及とプラットフォームの設置は矛盾するようにも見える。しかしながら、基準デー

タの蓄積は今後もオールジャパン体制で継続すべきである。しかるべき資源を投じない限り継続は難しいのは明らかだが、より広い関心を集めるためにも、専門分野を越えた協力、例えばデータ科学、計算科学や新しい計測手段を活用すべきである。また、今まで密接な付き合いが無かった層にも参加を呼び掛けて、新しい地平を切り開いていくことが期待される。例えば、他の材料についても研究対象に加えるなどが思いつく。さらに、鋭意、国際連携を進めることも大事になるだろう。

参考・引用文献

- 1) J. A. Ewing and J. C. W. Humfrey, The Fracture of Metals under Repeated Alternations of Stress, Philosophical Transactions of the Royal Society, 200, (1903), 241-250
- 2) 西原利夫, 櫻井忠一, 繰返引張圧縮応力を受ける鋼の強さ, 機械學會論文集, 5, (1939), 93-97
- 3) 藤井寛, 鋼の疲労と其恢復, 鐵と鋼, 12, (1926), 152-176
- 4) 松下徳治郎, 永澤清, 小松桂之助, 鋼の疲労に就て, 鐵と鋼, 14, (1928), 985-996
- 5) 高橋孝次, 特殊鋼の分離抗張力と疲労による耐久限に就て, 鐵と鋼, 18, (1932), (I): 1099-1130, (II): 1333-1374
- 6) 藤井寛, 小林幸一, 鋼の限界應力に就て, 鐵と鋼, 19, (1933), 358-361
- 7) 玉置正一, 特殊鋼の疲労並に衝撃破壊に於ける破壊起點の形状の影響に就て, 鐵と鋼, 20, (1934), 705-707
- 8) 高橋越二, 鹽谷喜久男, 繰返し圧縮を受けるヘリカルスプリングに現はれる疲労破損に就て, 日本金屬學會誌, 1, (1937), 320-334
- 9) 大柴文雄, 金屬の疲労, 日本金屬學會誌, (I): 4 (1940), A491-A496, (II): 4 (1940), A564-A570, (III): 4 (1940), A635-A640, (IV): 5 (1941), A48-A54, (V): 5 (1941), A86-A91
- 10) 市原通敏, 石原康正, 今野豊昌, 稻垣耕司, 疲労試験に依る疲労變形の研究, 日本金屬學會誌, 6, (1942), 405-411
- 11) 大柴文雄, 疲労割の發生及びその進展, 日本金屬學會誌, 7, (1943), 425-433
- 12) 津田覚, 疲労に関する研究, 日本金屬學會誌, (第1報): 8, (1944), 129-138, (第2報): 9, (1945), 4-5, (第3報): 11, (1947), 6a, (第4報): 11, (1947), 6-7
- 13) 石田制一, 材料の疲労に関する基礎的研究 (第1報), 日本金屬學會誌, 9, (1945), 5-7
- 14) 川田雄一, 切欠棒の二三の疲試験結果について, 日本金屬學會誌, 12, (1948), (第1報): 25-26, (第2報): 31-33
- 15) 疲労部門委員会, 疲労試験機, 材料試験, 3, (1954), 154-164
- 16) 日本材料学会疲労部門委員会, 日本材料学会疲労試験方法規格および同規格解説について, 材料, 12, (1963), 250-255
- 17) 金属材料技術研究所疲れ試験部編, 金材技研疲れデータシート No. 0, 「国産実用金属材料の疲れデータシート作成計画」, 金属材料技術研究所, 東京, (1978.12): 一部は https://smds.nims.go.jp/openTest/ja/content/fatigue_program.html (2022年11月2日閲覧) で閲覧できる。
- 18) 古谷佳之, 「疲労データシート」, 金属, 81, (2011), 1022-1027
- 19) Yoshiyuki Furuya, Hideaki Nishikawa, Hisashi Hirukawa, Nobuo Nagashima, Etsuo Takeuchi, Catalogue of NIMS fatigue data sheets, Science and Technology of Advanced Materials, (2019) 20:1, 1055-1072, DOI: 10.1080/14686996.2019.1680574
- 20) Yoshiyuki FURUYA, 10¹¹ Gigacycle Fatigue Properties of High-strength Steel, ISIJ International, 61, (2021), 396-400
- 21) 日本材料学会, 「WEB 版疲労データベースシステム」, https://fatigue.jsms.jp/WEB-manual_trial.pdf (2022年11月2日閲覧)
- 22) 田島次郎, 600t/400t 大型疲労試験機, 溶接学会誌, 44, (1975), 855-856: <https://www.cmi.or.jp/oogatahiroushikentou/> (2022年11月2日)
- 23) WES 1112 金属材料の超音波疲労試験方法, 日本溶接協会, (2022年3月1日改正 2017年3月1日制定) <http://www-it.jwes.or.jp/beviewer/viewer/?id=0999412cff904895b8475233f2d970c6&key=68dd8937f20e4a91adcbd1f327f451c2> (2022年11月11日閲覧)
- 24) 松浦融, 超音波疲労試験機によるギガサイクル疲労試験, 軽金属, 68, (2018), 316-320

8 | 高温クリープ

高温クリープ試験は通常大気中で実施される。すなわち鉄鋼の試験片は否応なく表面から酸化され経年的に減肉していく。不活性雰囲気での試験も有意義だが、実環境模擬という点では大気中試験を優先している。大気の温度と流れ（風）の変動は、試験温度の擾乱の原因となるので大気変動はできる限り抑制しなくてはならない。このように、高温クリープ試験はそれ自体が「複雑系」現象であることを予め断って置く。

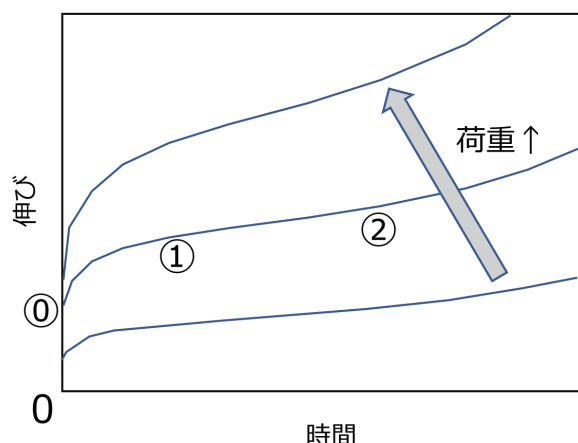
高温クリープ試験は、プラントの運転計画時間内で、設計温度をできるだけ高くしたいという点と設計温度での応力をできるだけ高くしたいという点の両方を確かめることが狙いになる。設計温度を高めることは熱効率の向上、設計応力を高めることはパイプや容器の肉厚の削減にも結び付く。

高温クリープは負荷をかけ続けるのでまさしく時間依存型の破損である。負荷による作用によって破損に至ると考えられている。クリープ変形が進み減厚するので破損に至るのか、別なき裂が発生し、それが成長して破損に至るのか…などと考えながら読んでいただきたい。

8.1 金属の高温クリープ

19世紀における高温での材料強度試験の目的は、高温での引張強さと弾性率の計測だった。

20世紀になると燃料効率の向上のために蒸気プラントの使用温度が上がっていった。1920年には火力



図表 8.01 高温での一定荷重試験では、伸びが時間とともに増加する。伸び方は荷重が大きいほど（温度が高いほど）大きい（筆者作成）

発電所の使用温度が 650 °F (=343 °C) だったが、30 年間で 1 000 °F (=538 °C) にまで上昇した。そうになると、高温での金属の性質の正しい把握が不可欠になる。室温で鉛がクリープ（creep）変形するように、高温になると鉄鋼も引張力を受けてクリープ変形することがわかった。

高温での一定荷重試験では図表 8.01 のように、伸びの時間変化は荷重の影響を受ける。1926 年にこの時間変化について、ベイリ（R. W. Bailey）は以下のような現象論的な解釈¹⁾を加えた。

まず、載荷した瞬間に①まで伸び、次第に変形速度を下げながらクリープする。これが①まで続くと、変形速度は一定となる。しかし、さらに変形が進むと②辺りから変形速度が時間とともに増す。そして、最後には破断する。ベイリは、①は弾性変形分、①まではクリープ変形が増加するが、「クリープによる歪硬化が高温による焼なまし効果によって連続的に打ち消されてクリープ速度が抑えられ、①以降バランスしてクリープ速度が一定になり」、②以降は断面が減少して引張応力が増加するので加速するためとした。この①～②間の“最小クリープ速度”の範囲が設計者にとって重要になる。

クリープ変形そのものに関する理論的な考察は 1925 年のベッカー（R. Becker）に始まる²⁾とされている。ベッカーは、高温における局所的な熱攪拌により局所的な応力振動が起きて、最も弱いところからすべりの局所ジャンプが始まる…というようなモデルを提案したようである。

この時代、実験室で数千時間を越える高温での連続実験はまず無理だった。そうなるようになるべく短時間のデータから長時間を外挿する試みが自ずから盛んになる。このアプローチが学理的に成功するか、実用的に使えるようになるかは未知数だが、まずは正確なデータを得ることが鍵になる。

8.2 戦前の足跡

【鉄と鋼】

8 巻（1922 年）に、菊田多利男（東北大学）が、弾性率測定について試験機と測定結果の紹介³⁾をしている。試験機の設計図はその後の高温実験用の試験装置の作成に大いに役立ったと推察される。

14 卷（1928 年）に、佐々川清（呉工廠製鋼部）が、1 000 ℃ までの衝撃曲げ試験、衝撃引張試験、疲労試験のそれぞれの試験装置の設計図を実験結果⁴⁾と共に示している。

28 卷（1942 年）に、池島俊雄（住友金属工業）が、圧縮試験で 1 200 ℃ までの変形抵抗⁵⁾を測っている。試験法は基礎現象を解析するために十分信頼度の高いデータを得ることができる方法である。

【日本金属学会誌】

3 卷（1939 年）で市原通敏（東北帝国大学）は、1 000 時間までの定荷重クリープ試験が可能な試験機の制作に成功したことを報告⁶⁾している。特に自動恒温機能を設計し、温度制御 ± 1 % を実現したとしている。歪の計測も 0.01 % 単位で読み取れるとしている。

4 卷（1940 年）では、清水篤磨（広島高等工業学校）が 6 回にわたり「金属の匍匐」について「講義」⁷⁾している。匍匐とはクリープの和訳に当たる。1922 年以降の内外の発表論文の総合的な概説となっており、クリープ速度に対する合金元素の影響、試験前の金属組織の影響などもまとめている。「クリープ破断応力」（図表 8.02）の紹介もあり、これは「鉄と鋼」に先んじている。

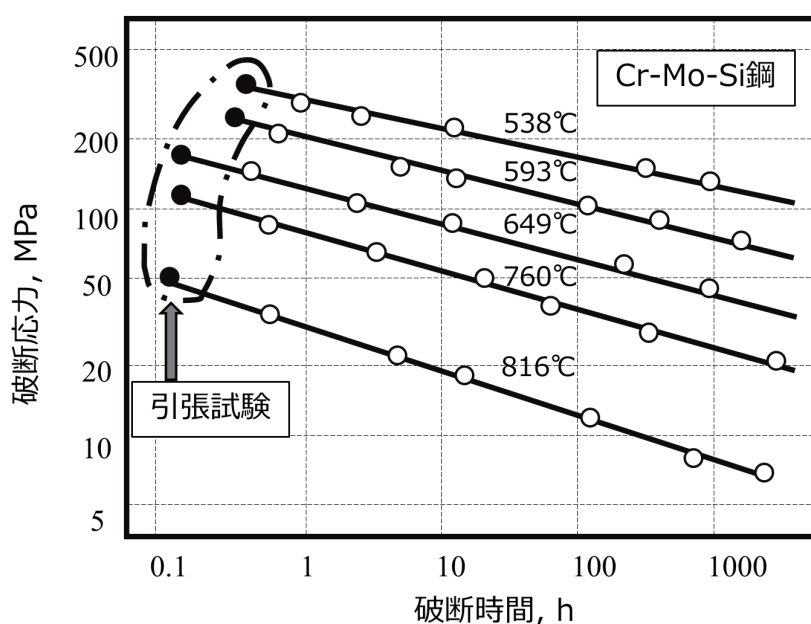
5 卷（1941 年）では、市原通敏（東北帝国大学）が 3 卷で紹介した装置を使って、「クリープ限」（クリープ変形を生じさせる最小応力）を実測し、それと内外の多数の異なった決定法による推定値と比較⁸⁾している。

【機械学会】

機械学会においてもクリープ変形に関する興味が中心のいくつかの報告がある。

実用上の問題を念頭に置いて、会誌 36 卷（1933 年）に、絹川武良司（住友伸銅鋼管）が、高温高压鋼管⁹⁾についてまとめている。欧米諸国での要求圧力、温度の上昇の歴史に触れ、日本でもまた、高温高压化が帰趨となっていることを述べている。また、鋼管に最低限必要な性質として、(イ)熱処理に鈍感なる材質、(ロ)時効硬化の無い材質、(ハ)高温での匍匐限度の高い材質、(ニ)充分な耐き裂性を具えること、(ホ)良質の素材で作ってあること、(ヘ)管の寸法が正確なこと、(ト)水圧試験に合格することを挙げており、信頼性確保のために多様な要求が顕在化してきていることがうかがえる。

このように、海外の文献から総合的に知見が紹介されているのが印象深い。その中で、クリープ変形を正確かつ長時間計測する試験機や測定法で着実な前進をしていることが分かる。だが、「クリープ破断寿命」の日本における実測値の発表は見られず、海外文献値からの紹介として初出となったのも 1940 年以降なので、信頼性向上技術としてはまだまだの段階だったと言わざるを得ない。



図表 8.02 クリープ破断寿命が応力と温度をパラメータにすると整理できることを発見
(文献 7 を元に、筆者作成)

ラーソン・ミラー (Larson-Miller) のパラメータ (1952 年)¹⁰⁾

クリープ破断強度の外挿の際によく用いられる指標である。

$$P = T(\log t + k)$$

絶対温度 T および破断時間 t の関数として表す。温度、負荷応力を変えたすべての実験値を、縦軸に負荷応力、横軸にパラメータ P をとって図示したとき、1 本のマスターカーブが得られるように定数 k の値を重回帰分析して定める。1952 年に既に提案されていたので、戦後日本には早くから導入された。

このほかにも多くの同様の提案があるが、ここでは、Larson-Miller のパラメータ P の背景を見てみる¹¹⁾ ことにする。

Arrhenius 型の反応速度 r は、活性化エネルギー Q 、気体定数 R 、定数 A でもって

$$r = A \exp(-Q/RT)$$

と書かれる。この熱活性化型反応が破断までの時間 t の限り一定で進行すると仮定すると反応量 C は、

$$C = rt$$

で表される。ここから、数式を変形していくと、

$$\log C = \log t - \frac{Q}{2.3R} \frac{1}{T} + \log A$$

$$\frac{Q}{2.3R} = T(\log t + \log A - \log C) = T(\log t + k)$$

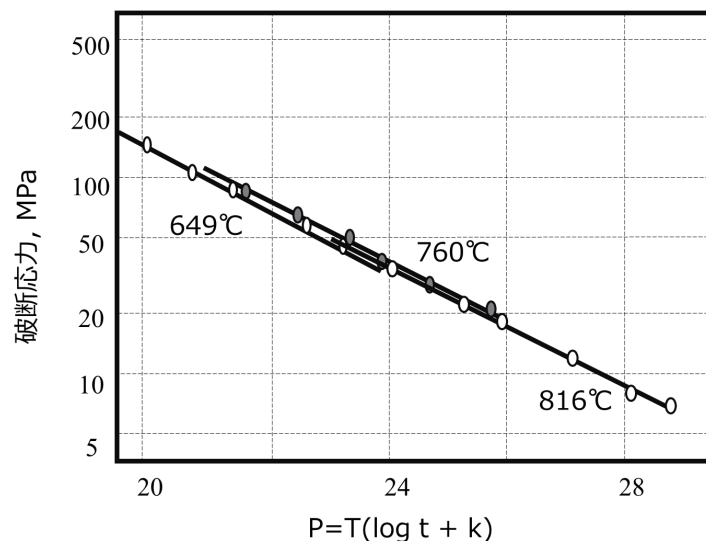
となる。最右辺が $= T(\log t + k)$ となる。

したがって、パラメータ P は活性化エネルギーに直接的に対応する。

そうすると、図表 8.02 は、図表 8. A1 のような一本の直線に整理できることが多い（高温側 3 温度だけにした。 $K=22$ ）。このように「外挿」によって長時間側の破断強度（寿命）を予測するという手法が生まれて、発展した。

このような整理の利用の仕方は多様に発展する。ひとつは、自ら取得した実験データに基づいて、寿命予測に使うことである。さらに有力なものは、第三者機関で得られた基準データから導かれた整理を参照として、自らの実績と比較することである。一般的には後者の信頼性がより高い。

ただ、この設定にいくつかの大事な仮定があるので、適用が問題のない範囲かどうかは実績データ次第で変化することはやむを得ない。



図表 8.A1 図表 8.02 のデータをパラメータ P で整理 (筆者作成)

8.3 戦後まもなくの時期

戦後となり、日本金属学会誌 13 巻（1949 年）には、小柴定雄、野原孝三郎（日立製作所安来工場）が「各種耐熱鋼の諸性質の比較」として、常温、高温の力学的性質（引張、衝撃値）、耐酸化性など、実用上不可欠な性能¹²⁾について調べている。

「鉄と鋼」では、出口喜勇爾（日本特殊鋼）が、35 巻～36 巻（1949 年～1950 年）の間だけでも精力的な 6 連報（最終的には 10 報以上）によって「耐熱鋼に関する研究」を報告している。主に高温引張の結果で、6 報に「高温匍匐強度（高温クリープ強度）」を引張とねじりで求めている¹³⁾。上記のいずれも、まだ破断試験には至っていない。

36 巻（1950 年）では、芥川武（東京大学）が、ガスタービン用耐熱材料に関する米国論文調査結果¹⁴⁾をまとめている。ここで最小クリープ速度応力に加えて、10、100、1 000 時間の破断応力を表で示している。これが、「鉄と鋼」に現れた「クリープ破断応力」の初出と思われる。芥川は、今後日本が苦勞すべき点が多々あることを念頭に置いてこの文献調査を行ったようだ。

少し後になるが、47 巻（1961 年）では藤田利夫（東京大学）が、耐熱材料が満たすべき多様な因子をまとめて、耐熱鋼の合金設計論を展開¹⁵⁾している。

- 室温力学的性質：引張試験値、硬度、衝撃
- 高温力学的性質：クリープ、クリープ破断、疲労強度、リラクゼーション
- 表面の安定性：耐酸化性、ガス中化合物に対する耐食性、熔融金属・熔融塩に対する耐食性
- 金属組織の安定性：炭化物・窒化物の析出・凝集、焼きもどし脆性・ σ 脆性、結晶粗大化
- 使用温度における性質の安定性：耐き裂性の低下、衝撃値の低下、応力腐食割れ
- 急激な熱疲労による性質の変化：耐き裂性、衝撃値、金属組織
- 熱間での加工性
- 溶接性
- 物理的性質：熱膨張率、熱伝導率、弾性率、減衰能など
- 経済性

といった項目を挙げている。その中でも、クリープと耐酸化性の性質の重要度が高いとして詳述している。

藤田、芥川は、1955 年頃以降鉄鋼協会講演大会

で、TAF 鋼（Todai-Akutagawa-Fujita）と命名したフェライト系耐熱鋼を発表¹⁶⁾¹⁷⁾している。TAF 鋼はその後、様々な改良が加えられ、現在では ASME Grade 92 と規定されている耐熱鋼の起源となった。現在、Grade 92 は高温高圧石炭火力発電などにおいて世界で最も普及しているフェライト系耐熱鋼の一つである。研究設備などが未熟な段階での発明としては驚愕に値する成果である。いわばこの Grade 92 の原点は上記に藤田が検討すべき要素とした多くの点で要求基準に総体的に良く適合していたものとも言える。

単発の性能で抜きこんでても技術としては社会的経済的に適応せず、より正しく言えば、抜きこんでた性能を活かそうと思えば、お互いに矛盾するような他の諸性能もバランスよく改善するように考え、工夫することの大事さを教えている。また、先端研究設備が十分でなくても開発できる実例を示したとも言えるが、藤田の研究手法においても「温度制御の正確な実験装置の自作」が際立っており、最先端実験を自ら実現したので信頼できるデータが得られたと捉えるべきと思う。

この後、TAF 鋼に留まらず新耐熱材料の研究開発が、産業界、大学でさらに推し進められる時代に移っていくがその詳細は別¹⁸⁾に譲る。

8.4 ナショナルセンターを目指した民間主体の活動

8.4.1 1955 年 日本鉄鋼協会「鉄鋼技術開発研究会」クリープ部会¹⁹⁾

従来、日本学術振興会第 129 委員会、日本材料試験協会などでクリープを取り上げ、研究が多数行なわれたが、残念ながら国として総合的に取纏めた權威のあるデータはなかった。前述のように国際市場に耐熱材料を持ち込むためには長時間データをつけないと相手にされなかった。そこで、1955 年 12 月に通商産業省、工業技術院の要望もあり、日本鉄鋼協会内に「鉄鋼技術開発研究会」クリープ部会を、まずは鉄鋼メーカーの八幡製鉄、富士製鉄、日本鋼管、川崎製鉄、住友金属工業、神戸製鋼、日本製鋼所、日本特殊鋼の 8 社で作成共同研究を開始した。共同研究はクリープ試験機の標準化、クリープ試験法の確立を目的とした。東北大学金属材料研究所、日本学術振興会、材料試験協会などの協力も得た。将来に『クリープセンター』の実現を期し、その基礎を築こうとするものだった。

8.4.2 1961年「クリープ試験技術研究組合」

共同研究が進むにつれ、速やかに国家的権威ある組織を望む要望が盛んになった。1961年5月に鉦工業技術研究組合法が成立をみた機会に通商産業省の指導を得て「クリープ試験技術研究組合」を設立した。前記8社が発起人となり1961年12月に創立総会を開催し、1962年3月には通商産業省の認可を受けた。日立製作所、東京芝浦電気、川崎重工業、日立金属、新三菱重工、いすゞ自動車、三菱製鋼、三菱鋼材、特殊製鋼、大同製鋼、太平金属工業、八幡鋼管、島津製作所、東京衡機製造所の14社が新たに加わりオールジャパンの組合となった。組合は「金属材料のクリープに関する試験研究、組合員の技術水準の向上を図るための事業を行なう」ことを目的に掲げた。クリープ試験機の標準化ならびにクリープ試験法による金属材料の物理常数の決定などの事業を推進しようとした。

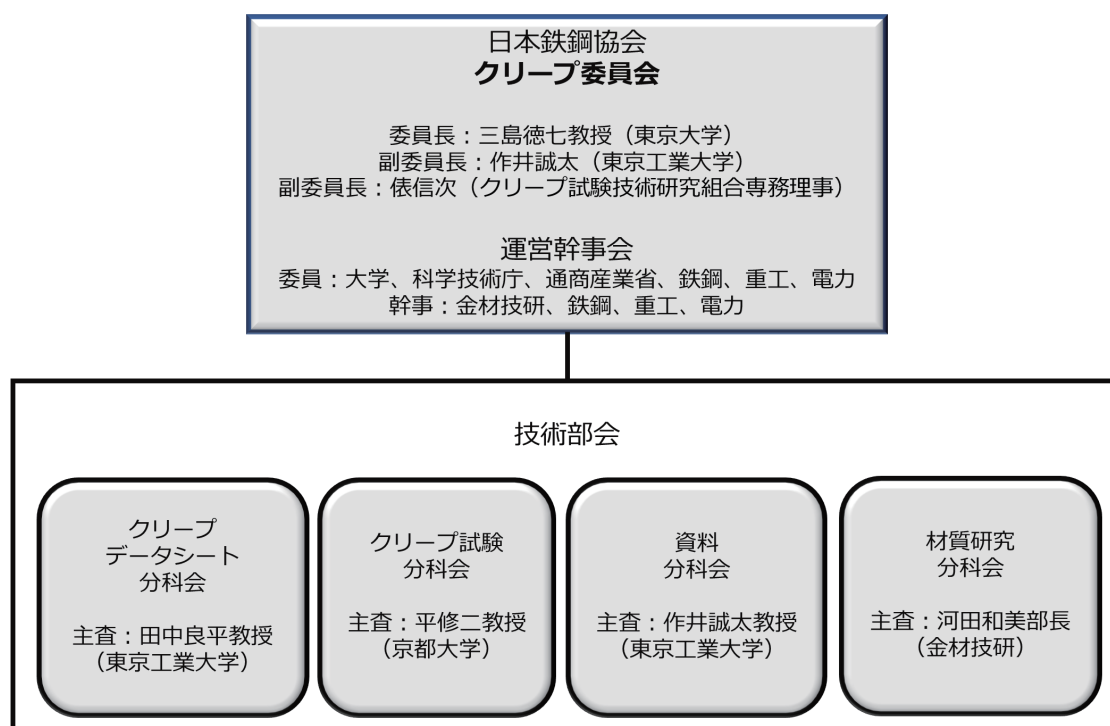
1963年1月に組合内に「クリープセンター設立準備委員会」を置き、各学会、団体、火力関係などに働きかけた。折しも科学技術庁が1964年の予算で、金材技研に材料試験所を設立する計画があるという情報に対応し、1963年9月に理事長名をもって設置要望書を科学技術庁、大蔵省に提出した。予算が成立し、世界的にも有数な試験所が実現することになった。組合としては新設される設備利用にも多大な期待があったようである。

8.5 1964年 ナショナルセンターとしての金材技研材料試験設備の整備開始

1964年より、金材技研では、国産金属材料のクリープ及び疲れに関する材料試験を中立国立機関の立場で系統的に実施する試験部門の建設を開始した。まずクリープ試験関係の整備に着手し、1968年度に完成した。次いで1969年度に疲れ試験関係の整備に着手し、1972年度に完成した。これらの材料試験設備の規模は世界的にみて最大級・最高水準のものだった。

この材料試験設備を有効、有益に利活用するために、産学官の有識者からなるクリープ委員会（図表8.03）を日本鉄鋼協会に設置し、技術部会を設け、そこにクリープデータシート分科会、クリープ試験分科会、資料分科会、材質研究分科会を作って、具体的な事項について審議し、金材技研への要望という形で諸事を決めた。この時の体制は下図のようになっている。

クリープデータシート分科会は「クリープデータシート作成作業方案」をまとめるのが役割で、試験対象鋼種をどうするか、試験鋼材をどうサンプリングするか、鋼材製造会社をどこにするか、試験鋼材をどうサンプリングするか、クリープデータシート作成のためのクリープ試験計画表などを議論し作業法案をまとめた。分科会は、その後「金材技研クリープデータシート連絡分科会」に再定義され、以降1986年まで活動



図表 8.03 クリープ委員会の構成
(木村一弘氏提供²⁰⁾ のものを元に筆者作成)

を継続し作業法案の実施のために機能した。

1986 年以降は、金属材料技術研究所が組織する「材料強度データシート懇談会」および「クリープ分科会」での審議に移され、事業の進め方に関する意見交換や得られた成果の共有が継続的に進められている。

クリープ試験分科会の主査を務めた平修二教授は、「クリープ試験技術研究組合」の技術委員会委員長として、クリープ試験機の統一化の共同研究を主導した。その成果は、「鉄と鋼」で 2 報^{21) 22)} にまとめて報告されている。

平は冒頭で「わが国においては、第二次大戦と戦後の混乱のため、欧米諸国に比してクリープ研究体制において極端な立ち遅れを来し、国際的に見て由々しい問題として認識されるようになり、過去数年間に急速にその試験設備の設置を必要とするようになった。日本各所におけるクリープ試験設備の拡充の速度は実に急速であって、約十年以前には国内でわずか数十台であったものが、現在ではすでに二千台に近いものが稼働しているものと思われる。しかし、この数とても日本全体として見ればその必要数をはるかに下回るものである。元来、クリープ試験は一見簡単であるが、上記のごとく、同時に多数本の試験片について、長時間

にわたり精密な試験を行なう性質のもので、信頼あるデータを得ることが困難なものである。その結果に影響を与える因子が多く、したがって各所で得られるクリープ値の相互関連性は耐熱材料の強度判定にとって極めて重要な問題である」と試験機の標準化に期待する基本認識を述べている。

試験機に関する諸元の影響を参加社によるラウンドロビンテストの結果に基づき検討し、その内、シングルタイプについては、以下のような指針を出している。

- ジョイントは安価なピンジョイントを用いて簡略化してよい。
- 試験片の形状の簡略化はできない。伸び測定にはダイヤルゲージ方式で十分。
- 加熱炉は安定性の高い大型炉でなくても、比較的小型炉でもよい。
- 温度調節装置としては、価格ではなく、長期の安定性が担保できればできる限り安価を追求すべき。
- 試験片寸法は直径 4 mm ～ 10 mm の間であればクリープ破断試験に影響がないが、工作上の問題を考慮すると直径は 6 mm ～ 10 mm の間がよい。
- 温度変動の影響は材質、試験温度にもよるが、 $\pm 4^{\circ}\text{C}$ 程度までは許される。



図表 8.04 稼働中のクリープ試験機が整然と並ぶクリープ実験室
(NIMS 提供²⁸⁾)

当時の試験最長時間が比較的短時間側であったので、その点の制約があるが、お互いのデータの相互比較性を有意化するという志向が共有されるようになり、日本規格を制定（関連 JIS 規格は 1956 年に制定）、見直しするための自前の共通基盤を形成した意義は大きい。おそらくこの研究組合の成果がクリープ試験分科会を通じて金材技研の事業にも注入、踏襲されたものと推察される。関連 JIS 規格は、以下のような経過を経て、現在 JIS Z 2271 に統合されている。

JIS Z 2271

1956 年：金属材料の引張クリープ試験方法

1968 年：金属材料の引張クリープ試験方法

1978 年：金属材料の引張クリープ試験方法

1993 年：金属材料の引張クリープ試験方法

1999 年：金属材料のクリープ及びクリープ破断試験方法

2010 年：金属材料のクリープ及びクリープ破断試験方法

JIS Z 2272

1956 年：金属材料のクリープ破断試験方法

1968 年：金属材料の引張クリープ破断試験方法

1978 年：金属材料の引張クリープ破断試験方法

1993 年：金属材料の引張クリープ破断試験方法

資料分科会については、データシート以外にデータブック（『金属材料高温強度データ集』^{23) -26)} がクリープ委員会編で出版されている）の編集なども関心ではなかったかと思われる。

8.6 金材技研（物質・材料研究機構）を ナショナルセンターとした超年事業の展開

どのように金材技研のこの事業の展開を紹介すべきか悩んだが、歴史的記述の手法を堅持し、かつ研究現場の苦心、苦勞をできるだけ現場の声を反映する形でまとめることができないかと思い、調べたら、一定の間隔で研究現場からの小史録が学術誌に掲載されていることを見出した。以下にそれらを紹介する。

まず、全体感を把握するには、45 年間全体をまとめた大場ら（2011 年）による論稿²⁷⁾ が分かりやすい。これは、中目黒地区をベースにしているが、2011 年に設備をつくば地区に全面移転した結果も含めている。

- 試験数：67 の材種、370 の製造番号、引張試験を含めて約 15 000 本。内、10 万時間以上が 734 本、

20 万時間以上が 125 本、30 万時間以上が 18 本。最長時間は 14 853 日（＝約 40 年 8 か月）を越え、それまでの世界最長の 356 463 時間（ドイツ ジーメンス社）を上回った。積算試験時間は年換算で約 3 億年に及ぶ。

- データシートの発行：延べで 143 冊が発行されており、当初は印刷版配布だったが、現在ではデジタル版が HP で公開されている。
- 試験設備：総台数 998 台、実施可能試験片本数 3 106 本。内、単式は 874 台（874 本）。独自の試験機規格を設けて管理している。つくば地区では、単式試験機が 500 台に集約されて、試験は中断措置を施した上で、継続されている。
- 温度測定：白金・白金ロジウム熱電対で温度監視している。当初、氷零接点使用、起電力の定時アナログ計測などだったが、現在では電子冷却式零度基準接点（精度： $0 \pm 0.06^{\circ}\text{C}$ ）、1 日 2 回のデジタル自動計測、データ保存となっている。
- 熱電対校正：約 3 000 対の熱電対を温度標準の国際的トレーサビリティを基準として、校正精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内とし、試験温度は JIS 規格の許容範囲の 1/2 以内の厳しい温度制御を実施している。
- 試験材の選択基準：①国産材料である、②原則として市販材、③複数社で製造されている、④製造実績がある、⑤高温装置・機器用材料として、一般に使用されている規格材、⑥近い将来使用され、かつ重要であると判断される材料（開発中は除く）。かつては「日本鉄鋼協会・高温強度研究委員会」及びその下部組織である「金材技研クリープデータシート連絡分科会」で審議され、金材技研への要請となっていたが、1986 年以降は研究所の「材料強度データシート懇談会」および「クリープ分科会」での審議による。これらは産官学の有識者から構成されている。
- 試験手順：マニュアル化されており、また計測法などの改善に伴い適宜見直しされている。詳細は「金属」誌に詳しい。

ここに至る経緯やトピックスは、大場ら以前に書かれた論稿群からピックアップしてみる。

横井信（1973 年）²⁹⁾ は、1 万時間を超すクリープ破断データが得られるようになったタイミングで書いている。この事業開始の背景について、高温設備の許容応力の決定において米国などの海外例を参考にしていたが国産材料の自前データへの要望が高まったことを述べている。日本鉄鋼協会クリープ委員会の意見を十分に反映しながら事業を進める基本姿勢を強調し、

十分信用に足る試験データが蓄積したことを丁寧に説明している。

横井信ら（1976年）³⁰⁾は、数万時間のデータが得られるようになったことを報告し、大場ら（2011年）に至る基本線を示している。ここではほぼ試験実施の基盤が固まったと言える。データシートの配布については、「金属材料の高温特性に関する情報交換を原則的な条件」として、国内約160か所、国外32か国、約180か所の大学、研究機関および関連企業に配布（無料、郵送）していることを述べている。今後、考慮すべき問題点として、①試験材料の熱処理条件が必ずしも明白ではない、②試験材料が含む微量な不純物の影響を勘案する必要がある、③室温を含む所定の温度での材料強度の評価法が統一されていない、などを指摘している。

田中千秋、八木晃一（1994年）³¹⁾は、27年経過時点での報告である。10万時間越えが538本に達した。溶接継手の試験も開始している。長時間試験事業を継続する難しさを痛感しつつ、事業開始時には世界にクリープ実施機関が多数あったが、一つ欠け、二つ欠けして、気づいたら、広範な材料、試験条件で長時間クリープ試験を実施している中立的な研究機関が国際的に他にはなくなってしまったことを述べ、この事業の貴重さを訴えている。長時間データが国際的に研究者の共通財産化してきた。長時間クリープデータ、長時間応力緩和データに加えて、クリープき裂成長速度計測なども定着してきた。また、長時間試験に頼ることなく余寿命予測ができないかという発想の研究も盛んになっている。金材技研独自のアイデアとして、「長時間を極めた究極のクリープ強度はいかん？」という問いかけが発せられた。既に述べたように当初は、「クリープには限界応力」があると考えられたが、温度上昇、試験時間延長に伴いクリープ強度は低下するばかりであり、限界応力があるとも思えない。しかし、合金組成や試験前の金属組織の影響がだんだんと小さくなっていく。これは長時間保持によっていわば「安定構造」に漸近するものとすれば当然とも言える。そうするとこれ以下にはならない「基底クリープ強度」というアイデアが生まれた。このように金属組織の変化のダイナミックスと変形・破壊を関連付けて考える方向性が一層強まっていく。

木村一弘（1996年）³²⁾は、自らが提唱した「基底クリープ強度」を解説している。この考えが提唱された当初は「材料開発の意義を否定するのか」というような反発を一部招いた。木村はそれに対して、「基底クリープ強度」の材料設計こそ大事と反論し、微量元素の影響

響、固溶元素と浸入型元素との原子対などと変形との関係を原理的に説いた。精確な長時間試験を実現したからこそ見えた新しい世界と言って過言でない。なぜ破断するのかという耐破損性の根本には至っていないが、確実な土台の一つとなろう。

阿部富士男（1998年）³³⁾は、1950年代あたりでは10万時間クリープ破断強度は外挿推定値だったが、今は10万時間試験値に基づいて許容応力設計されるようになったことを示し、31年が経過した本事業の社会的意義を訴求している。3万時間データから10万時間強度を外挿で決めたとしても、5万時間あたりで強度低下が見え始め、10万時間強度が許容値を満たさなくなる、という重大な事態になる。この現象を正しく理解していくためにも長時間クリープ試験の結果は有力となるとしている。

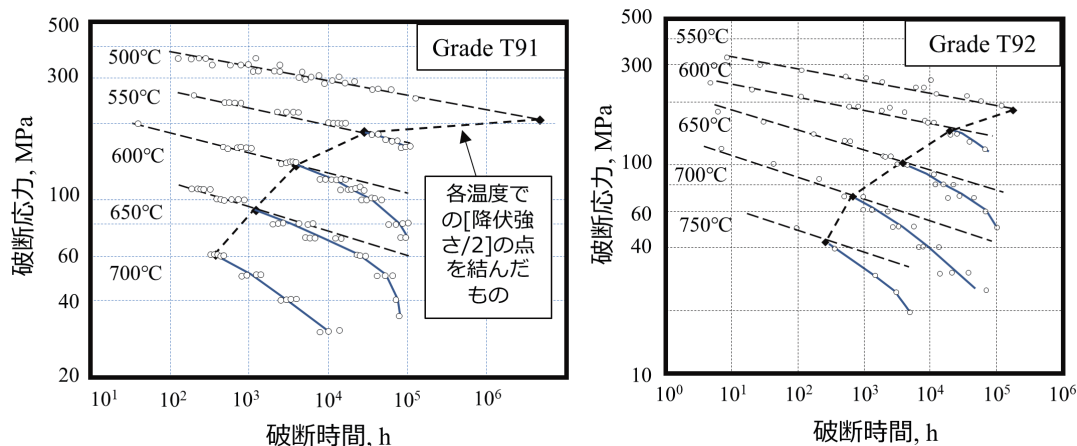
木村一弘ら（2004年）³⁴⁾は、2004年3月時点で、当初の計画数はほぼ終了し、試験片本数が10403本に達し、10万時間を超えるデータ数が708点となったとしている。得られた成果、知見は国際的にも貴重な基盤データとなりつつあるという認識を強くしている。それにしただけで、知見のまとめかたおよびその公表についての新しい試みを紹介している。従前からのクリープ破断データに加えて、長時間クリープ変形データ、金属組織写真集、応力リラクセーションデータ、溶接継手クリープデータのデータシート化とそれらのインターネットによる発信に取り組むとしている。さらに、国内外の規格検討作業に積極的に貢献していく決意を述べている。

民間企業が単独では実施不可能な数十年に及ぶ長時間試験を系統的かつ大規模に実施することができたのは、関連する産学官の強力な連携プラットフォームが機能し続けたことにあることを指摘し、今後とも状況の変化に対応しながら事業の継続を追求する意義とそれに伴う難しさを訴えている。

大場敏夫ら（2011年）²⁷⁾の内容は上述したが、このプロジェクトにとって大きな転換点となったつくば全面移転が規模等の見直しを含めて、見事に成し遂げられた感慨が背景に読み取れる。

Sawadaら（2019年）³⁵⁾は、50年にも及ぶ事業において蓄積し、得られた知見を以下のようにまとめている。

- 長時間側強度が短時間側強度による外挿から外れる度合いは鋼種による。
- 同一鋼種でも製造番号による差は生じるが、その度合いも鋼種による。化学成分、粒径、微量元素などの影響を考慮していく必要がある。



図表 8.05 クリープデータシートの長時間データから利用基準の新しい考え方を提案
(文献 36、37 を参考に筆者が作成)

- フェライト系耐熱鋼では、超長時間での「基底（固有）クリープ（破断）強度」があり、それが微量の固溶強化元素による「固溶強化」と関係している。
- クリープ変形挙動は、クリープ中に析出現象が起きると極めて複雑な変化を示す。この影響は、低合金鋼やオーステナイト系ステンレス鋼で顕著になる。
- 焼きもどしマルテンサイトを試験前の金属組織とするフェライト系耐熱鋼における長時間側のクリープ強度の判定法として、「領域分割法」と名付けた新しい考え方を提案した。

※図表 8.05 は、筆者が「領域分割法」に倣い、それぞれの試験温度での破断応力が降伏強さの半分になる破断時間の点を描き込んで結んだものである。彼らの提案通り、この破断時間より短時間側領域と長時間側領域では、破断応力－破断時間の関係を示す曲線が分かれている。また、短時間側データによる外挿と比べると高温ほど長時間側破断応力が大きく低下していることが良く分かる。しかも、高温ほど外挿から外れる時間が短くなっている。高温プラントの信頼性マネジメントのためには、このような長時間側データの取得が不可欠なことを如実に示すものである。

- いくつかの耐熱鋼については、金属組織アトラス、時間－温度－析出ダイヤグラム、破壊モードマップなどを作成している。

8.7 今後の展望

高温クリープでは、使用温度において

- クリープ変形量が許容量以下であること
 - 破断寿命と破断応力が設計値より十分に安全側であること
- が問われる。

これらについて、それぞれの研究者や企業で独自のデータ取得やデータ解析があってしかるべきだが、社会的責任の高いプラント設計に向けて、以下のような段階を踏んでいくことが分かった。

- 関係者間で慎重に検討され合意された統一試験規格に基づくデータ取得を行うことが共通土台となる。信頼できる規格が他の国にあればそれに倣うのもよいし、参考例が無ければ関係者が共同研究などを通じて合意形成を目指すのもよい。戦後日本では共同研究も実施しつつ、海外の勉強もしたものと思われる。
- 全体が納得できる安全基準（設計基準）が求められる。統一試験規格に基づき得られた実験データを解析することにより、クリープ変形量の予測、クリープ破断強度の予測などが進められるのは当然であり、データの蓄積によってそれらの精度や確度がだんだんと高まっていく。
- 社会的にオーソライズされた参照値を期待する声が高まる。実験をどこが実施するかは肝要ではなく、社会的にオーソライズできればよい。大学研究所であれ、企業試験所であれ構わないが、日本はオールジャパン体制を採りながら国立研究所を実験実施場所を選んだ。その際に、国産材料の国際的競争力アップを目標として、全国的な大同団

結を図っている。

- 日本のこの選択は、第三者性の利点のみならず、長期間の継続性の担保で結果的に大きな効果があった。これは国際的にも特筆される特徴である。

これからこの仕組みの優位点を活かしながら、以下のような展開が期待される。

(1) 国際規格や設計基準への反映

得られる試験データの解析が進むと新しいアイデアやより信頼度の高い判断基準が生まれていくことは間違いない。それらの成果を速やかに国際規格や設計基準の見直しなどに反映していくべきである。

(2) オールジャパン体制の堅持

しかるべき資源を投げ続けられない限り、このような事業の継続は難しい。より効率的効果的に推進する工夫が常に求められる。さらに、専門分野を越えたより幅広い参画を呼び込むことも大事である。

例えば、他の専門分野である、データ科学、計算科学や新しい計測手段の活用を通じて、新しいより高い地平を切り開いていくべきである。また、ニーズが高い新しい対象（材料、環境など）を試験対象に加えていくことも大事である。さらに、国際的な連携を有効に活用する姿勢も一層大事になるだろう。

実験設備が比較的小型で簡明なので様々な機関に設置して全体で共有することも考え得るが、それは決して得策ではない。管理とデータ取得が統一した同じ方法でなされることを保証することが難しい。

試験対象を新しく広げることが今後も想定されるが、上記のようなオールジャパンで共有できる手法と進め方で行うのがよい。試験設備を大型化せざるを得ない場合は、躊躇うことなく公的機関に設置し、運用する方向で検討するのがよい。

(3) 貴重なデータの共有から新しい価値を生み出す

NIMS データシートには、化学組成、試験前の金属組織が特定できる各々の試験材で、一定温度、一定荷重におけるクリープ変形の時間変化が、破断までもしくは10万時間を超える「生データ」が記録保存されているのは他に類を見ない財産である。クリープ破断時間の測定値、さらに破断時の金属組織観察データなども付記されている。これは、天文観測データのように宇宙の運動方程式を求める基盤となったものに匹敵するが、人工データとしては他に類例を見ないものと思われる。機器の安全基準の設計、判定の基礎となるばかりか、高温クリープにおける変形と破壊のメカニズ

ムの解明にも貢献できる基盤データとなるはずである。

参考・引用文献

- 1) R. W. Bailey, Note on the softening of strain hardened metals and its relation to creep, Journal of the Institute of Metals, 35, (1926), 27-40.
- 2) R. Becker, Thermal Inhomogeneities, Physikalische Zeitschrift, 26, (1925), 919
- 3) 菊田多利男, 高温度における各種金属の剛性及び粘性に就て, 鉄と鋼, 8, (1922), 1-18
- 4) 佐々川清, 鋼の機械的性質に対する温度の影響(II), 鉄と鋼, 14, (1928), 637-658
- 5) 池島俊雄, 高温度に於ける鋼の変形抵抗に関する研究(第1報), 鉄と鋼, 28, (1942), 1185-1194
- 6) 市原通敏, 簡単な匍匐試験装置と一実験例, 日本金属学会誌, 3, (1939), 45-47
- 7) 清水篤磨, 金属の匍匐, 日本金属学会誌, 4 (1940), (I): A213-A216, (II): A253-A257, (III): A290-A293, (IV): A335-A339, (V): A380-A387, (VI): A432-A435
- 8) 市原通敏, 匍匐限諸定義の実験による比較, 日本金属学会誌, 5, (1941), 286-294
- 9) 絹川武良司, 高温高压気罐用鋼管に就て, 機械学会誌, 36, (1933), 12-21
- 10) Larson, F. R. and Miller, J., Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 74, (1952), 765-771
- 11) 井上毅, 新しい焼きもどしパラメータとその連続昇温曲線に沿った焼きもどし効果の積算法への応用, 鉄と鋼, 66, (1980), 1532-1541
- 12) 小柴定雄, 野原孝三郎, 各種耐熱鋼の諸性質の比較, 日本金属学会誌, 13, (1949), 25-29
- 13) 出口喜勇爾, 耐熱構造用鋼の研究 - 耐熱鋼の研究(VI), 鉄と鋼, 36, (1950), 30-35
- 14) 芥川武, 最近の耐熱材料について, 鉄と鋼, 36, (1950), 500-509
- 15) 藤田利夫, 耐熱材料について, 鉄と鋼, 47, (1961), 53-78
- 16) 芥川武, 藤田利夫, 竹村数男, 鉄と鋼, 41, (1955), 986-988が最初ではないだろうか
- 17) 藤田利夫, 火力発電プラント用耐熱鋼の発展, まてりあ, 40, (2001), 938-942
- 18) 太田定雄, フェライト系耐熱鋼, 地人書館, 東京, (1998)
- 19) 俵信次, クリープ研究組合の現状, 鉄と鋼, 51,

- (1965), 99-100
- 20) 木村一弘, 私信, (2022 年 7 月 13 日) ※ NIMS に保管されている「クリープ委員会」議事録による
- 21) 平修二, 昭和 36 年度シングルタイプ・クリープ試験機の標準化に関する研究 (クリープ試験機の標準化に関する研究-I), 鉄と鋼, 51, (1965), 101-119
- 22) 平修二, 昭和 37 年度マルチタイプ・クリープ試験機の標準化に関する研究 (クリープ試験機の標準化に関する研究-II), 鉄と鋼, 51, (1965), 269-285
- 23) 日本学術振興会 第 129 委員会第 3 分科会編, 金属材料高温強度データ集 第 1 編 低合金鋼編, 養賢堂, 東京, (1964)
- 24) 日本学術振興会 第 129 委員会第 3 分科会編, 金属材料高温強度データ集 第 2 編 ステンレス鋼編, 養賢堂, 東京, (1968)
- 25) 日本鉄鋼協会クリープ委員会, 金属材料高温強度データ集 第 3 編 炭素鋼及び鋳鉄編, 日本鉄鋼協会, 東京, (1977)
- 26) 日本鉄鋼協会クリープ委員会, 金属材料高温強度データ集 第 4 編 耐熱合金編, 日本鉄鋼協会, 東京, (1979)
- 27) 大場敏夫, 澤田浩太, 木村一弘, クリープデータシート, 金属, 81, (2011), 1006-1015
データシート資料集 No. 10, 金属材料技術研究所クリープデータシート作成の試験計画と試験技術, NIMS 構造材料強度データシートオンライン, (1996), <https://mits.nims.go.jp>
- 28) NIMS (国立研究開発法人物質・材料研究機構) 千現地区 クリープ試験機群, <https://www.nims.go.jp/news/archive/2020/02/202002280.html> (2022 年 11 月 4 日閲覧)
- 29) 横井信, 金材技研における長時間クリープ破断試験, 材料, 22, (1973), 188-193
- 30) 横井信, 池田定雄, 伊藤弘, 馬場英次, 金属材料技術研究所におけるクリープデータシート作成の現状, 鉄と鋼, 61, (1979), 2076-2087
- 31) 田中千秋, 八木晃一, 耐熱金属材料の 10 万時間クリープ特性の評価と高温クリープ研究の新たな展開, 鉄と鋼, 80, (1994), 255-262
- 32) 木村一弘, 金材技研クリープデータシートから生まれた高温強度の新しいとらえかた, まてりあ, 35, (1996), 535-641
- 33) 阿部富士男, 世界最長時間のクリープ試験, まてりあ, 37, (1998), 7
- 34) 木村一弘, 田淵正明, 山崎政義, NIMS クリープデータシートプロジェクト-38 年間の足跡と今後の展開-, ふえらむ, 9, (2004), 816-820
- 35) K. Sawada et al, Catalog of NIMS creep data sheets, Science and Technology of Advanced Materials, 20 [1], (2019), 1131-1149, DOI:10.1080/14686996.2019.1697616
- 36) 物質・材料研究機構 クリープデータシート, No. 43A, 物質・材料研究機構 中核機能部門 材料情報ステーション, 改訂第 1 版, 平成 26 年 3 月 31 日
- 37) 物質・材料研究機構 クリープデータシート, No. 48B, 物質・材料研究機構 構造材料研究拠点 構造材料試験プラットフォーム, 改訂第 2 版, 平成 30 年 3 月 31 日

9 | 大気腐食

地球のコアの化学成分は、Fe-5 %Ni と推定されているので、鉄の源は無限とも言える。しかし、人類が採掘できるのは地殻の地表部分に限られるので、鉄の実質的な源は地殻の鉄鉱石だけになる。鉄鉱石は、酸化鉄が海底に沈殿して鉄床、鉄脈となったものが地殻変動で地表近くに上がってきたとされる。光合成するシアノバクテリアが海水に溶け込んでいた二酸化炭素を摂り入れ酸素を出し、それが海水中で鉄イオンと結びついて固体の酸化鉄ができたと言われる。その鉄鉱石を高温で還元し（酸化鉄から酸素を奪って）できたものが人工の鉄である。

化学的に「無理矢理」鉄と酸素を引き離しているので、固体の鉄は室温でも容易に、気体の酸素、水があると鉄の酸化物、水酸化物などに戻るのは至極自然である。これを大気腐食と呼ぶが単純そうで実は単純でない。典型的な複雑系現象であり、経年的な損耗の典型例でもある。また、世界的に見ても損耗の深刻さでの地域性が際立つ。

大気腐食は、応力がかかる場合も重要だが負荷応力無しでも生じるので、基本は上で述べたように電気化学的負荷による時間依存型の損耗である。水、酸素、電位差などからの絶縁を考えれば、塗装などの表面処理が大事になるが、ここでは敢えて「裸表面」を対象にしている。耐食、防食を考えるのに、腐食をまず知る意義はどこにあるのか…などと考えながら読んで欲しい。

9.1 戦前の足跡

【鉄と鋼】

4 巻（1918 年）に「橋梁鋼材の腐蝕調査」¹⁾ が、塚本小四郎、張忠一（鉄道院）から報告されている。湿度の高い山陰線余部鉄橋（脚）、北陸線庄川橋（桁）、東海道線山北－駿河間（桁）の三か所が対象となった。いずれも米国製錬鉄が使われていたと思われる。前二者では海塩分の影響、後一者では煤煙・煤の影響を心配した。調査対象外だった東北線利根川橋梁、信越線犀川橋梁には建設後 30 年経過しても著しい腐食はないのに、16 年～17 年しか経過しない庄川橋、山北－駿河間の橋には一部取り換えが必要なほどの腐蝕が認められた。余部鉄橋はさらに腐食がはげしいものだったことを報告している。爾来、日本特有の大気腐食要因があることを雄弁に示す調査結果となった。

14 巻（1928 年）に、川上義弘（日本特殊鋼）の「耐錆鋼」に関する報告²⁾ がある、これは各種鋼材の多種多様な腐食試験とその結果をまとめたものであるが、その一節に「露天試験」がある。ガラス板の上に一辺 15 mm の立方体サンプルを置き、夏期の 2 か月間、晴雨、昼夜問わず、戸外に暴露して錆びの有無、変化を目視で観察している。対象は銃身鋼、砲身鋼、半硬鋼、耐錆合金 3 種の 6 種類である。鋼種によって発錆時期の違い、錆びの成長の違いなどが顕著になることを報告している。

【日本金属学会誌】

日本金属学会誌には「大気腐食」に関する報告は見当たらなかった。

【機械学会】

会誌 37 巻（1934 年）に山本洋一（理化学研究所）による腐食全般の精緻な講義³⁾ があるが、残念ながら大気腐食までは紙幅が及んでいない。

以上から、大気腐食が日本では避けて通れないことの認識は早くから得られていたことが分かるが、これらの学会誌で見る以上、あまり多くの研究例が戦前には無い。専門学会の活動が盛んになるのも戦後になる。

9.2 腐食損失の見積もり

日本における腐食が社会にとって大きな損失となることを社会にどのように訴求し、関心を集め、技術開発への投資を効果的に呼び込むかについて、腐食関係者達は常に腐心してきた。その大きなヒントを与えたのは、米国、MIT の Uhlig 教授の試算である。

9.2.1 1952 年「腐食に支払う莫大な金額」⁴⁾

『防食技術資料』編集委員署名記事で、1949 年の米国、MIT の Uhlig による試算で年間腐食損失額 55 億ドル（約 2 兆円）としていることを詳しく紹介し、Uhlig の算定方式に倣い、日本の腐食損失を約 350 億円と推定している。半分为塗装経費となっているので、これはほぼ大気腐食対策と見てよい。

9.2.2 1977 年「わが国における腐食損失調査報告書」⁵⁾

通商産業省の補助を受け、日本防錆技術協会と腐食防食協会が、「腐食損失調査委員会」を設置し、調査結果をまとめた。Uhlig 方式による生産・製造面から

算出した腐食対策費の総計は 2.55 兆円、Hoar 方式による業界分野毎の腐食対策費の総計は 1.04 兆円となった。両者の差は大きいがいずれにせよ 1974 年の GNP である 136 兆円の 1 % ~ 2 % に相当することは明らかである。なお、Uhlig 方式試算における塗装経費は、62.5 % を占めた。

9.2.3 2001 年「わが国の腐食コスト」⁶⁾

物質・材料研究機構「超鉄鋼材料研究」プロジェクトからの要請もあり、日本防錆技術協会と腐食防食協会が「腐食コスト調査委員会」を設置し調査結果をまとめた。Uhlig 方式で算出した腐食対策費の総計は約 3.9 兆円で 1977 年の 1.54 倍となった（名目 GNP は約 3 倍）。塗装経費は 58.4 % だった。Hoar 方式で調査した腐食対策費の総計は 5.26 兆円と大幅に増えた。これは調査がより関連業界網羅的になったことが反映した影響が大きいのだろうが、メンテナンスコストの比重が高まったことも増額の要因になっていると考察している。第 3 の方法として産業連関表を利用した In/Out 方式での試算も試みている。Uhlig 方式に使ったデータをこの方式に当てはめると試算結果は 9.7 兆円となった。In/Out 方式では「数え落とし」は最小化されるはずなので積み上げ方式である Uhlig 方式、Hoar 方式は過少評価となっている可能性があることを示している。いずれにせよ腐食コストとして「失われる」ものは巨額となると強く認識する必要がある。

9.2.4 2015 年「わが国における腐食コスト」⁷⁾

日本防錆技術協会と腐食防食協会の「腐食コスト調査委員会」が前回から約 20 年後に同様の調査を行った。Uhlig 方式の集計では 2015 年の損失総額は 4.3 兆円、GNI の 0.78 % だった。1997 年の約 4.6 兆円の 0.94 倍、1974 年の約 2.6 兆円の 1.68 倍となった。塗装経費が 58 % と最も多い内訳を占めている。Hoar 方式では 2015 年の総額は約 6.6 兆円、GNI の 1.27 % だった。1997 年には 5.2 兆円の 1.27 倍、1974 年の 1.1 兆円の 6.22 倍となった。Hoar 方式はメンテナンスコストも積算するので、Hoar 方式の積算の伸びが大きいのはメンテナンスコストの比重が高まっているためと委員会は分析している。

腐食を 100 % 避けることは無理としてなるべく腐食に強く安価な素材と安価で一定期間緻密に保護する表面処理（塗料）の組合せの選択となる。だが、それらの防食性はいかほどか、最も避けるべき環境条件は何か、などについての、実験データと原理的理解がまだまだ乏しい。

9.3 暴露試験場の全国展開

「大気腐食」というので「大気＝酸素」と理解する人も多いだろうが、残念ながらそう単純ではない。「大気中腐食」の方が誤解は減るように思うが、大気の状態がすべて関係する腐食を「大気腐食」と定義している。すなわち、考慮すべき環境条件は温度、湿度、日照・降雨・風条件、付着物の種類や量、腐食性ガス濃度など多岐多様である。

それぞれの影響因子が単独に腐食度合いに及ぼす影響を実験的に求めたとしても、それらの影響が加算されるのか、そうではないのか、最も影響度の高い影響因子はなにか、などの疑問に説得的に答えられるとは言いきれない。試験材料が違えば影響度も異なるかもしれない、場所が違えば影響度の順位も変わるかもしれない、などの問題もあるだろう。大きな難点の一つは影響因子が時間と共に変動するので「定型パターン」を想定し、模擬試験、加速試験を行う意義が薄れてしまうことだ。

したがって、実環境で一定時間の暴露試験を実施することが必然的な帰結になる。もしわが国の気象の季節変動などが小さくある幅の変動条件で模擬できるとしたら事情は異なっていただろうが、南北に広がる海洋国家であり、四季変動が大きいモンスーン地帯にあるので、単純化は土台無理であり暴露試験の意義は極めて高くなる。

JIS 制定規格 Z 2381 (1979 年)「大気暴露試験方法通則」、Z 2382 (1998 年)「大気環境の腐食性を評価するための環境因子の測定」、Z 2383 (1998 年)「大気環境の腐食性を評価するための標準金属試験片及びその腐食度の測定方法」に基づき、民間会社でも公的規格に基づき大気環境での腐食を観察し、また第三者から受託業務を旺盛に展開できるようにしている。JIS 規格制定過程を見ると大気暴露試験がまず 1979 年に制定され、1998 年に試験片、腐食度、腐食環境など測定に係る詳細な検討が進んだことがフォローできる。これが丁度、前記のオールジャパン体制での腐食コスト調査の実施・公開時期と重なっていることが注目される。なお、Z 2381 に対応する国際規格は未だなく、国際的に日本が先行して定めている。

以下に、民間会社を除き公的機関で公開されている暴露試験場を挙げてみた。大雑把に言えば公的機関の役割は法的基準を定める際の基礎データの取得とそれにかかわる基礎・基盤研究であり、民間では商取引に係る保証データを自ら取得、または受託による取得

錆びで錆びを制す耐候性鋼

Fe（鉄）にCu（銅）やP（リン）などを添加すると大気腐食を抑制する効果があることは早くから知られており、1900年頃からアメリカでは含Cu鋼が市販されていた。さらに強度を上げようと様々な元素の少量添加を検討する中でCu、Cr（クロム）、Ni（ニッケル）、Pなどが大気腐食抑制に効果があることが分かった。ここから耐候性鋼として1933年にCORTEN-A（US Steel）、MAYARI-R（Bethlehem Steel）が商品化された。だが無塗装で橋梁用に使うようになったのは1960年代になってからとされている。

日本では鉄鋼各社で1950年代から開発競争が始まった。1957年に日本鋼管による含Cu鋼に若干のPを添加した成分系の耐候性熱延鋼板の市販を皮切りに、1958年に川崎製鉄がCu-P系の耐候性鋼高張力鋼を市販、1960年に八幡製鉄、Cu-P-Cr系を開発。富士製鉄がCu-P-Cr-Ni系の耐候性高張力鋼を販売開始。日本鋼管がCu-P-Cr-Mo（モリブデン）系を開発。、1962年に日本製鋼所がCu-P-Cr-Zr（ジルコニウム）系を開発。1963年に住友金属工業、1964年に川崎製鉄、Cu-P-Cr-Ni-Nb（ニオブ）系を発表、神戸製鋼所がP-Cu-Ni-Cr系と次々と発表が続いた。

現在、耐候性鋼はJISで二つの規格にまとめられている。

JIS G 3114：溶接構造用耐候性熱間圧延鋼材

鉄骨造に使われる溶接構造用圧延鋼材の耐候性を高めたもの

JIS G 3125：高耐候性圧延鋼材

P添加で耐候性を高めているがそのため溶接性が劣るので、非溶接用途に利用する。

近年においても、さらなる研究開発がなされており、海浜環境用にNiを増量したNi系耐候性鋼が市販されている。また、再精製過程で容易に取り除けるSi（ケイ素）、Al（アルミニウム）などの元素（Cu、Niなどはほぼ取り除けない）のみで設計されたSi-Al系耐候性鋼の研究開発も行われている。

【保護性錆】

耐候性鋼の表面には最初赤みが強く発錆するが、徐々に緻密なアモルファス層に変化していきそれが錆びのそれ以上の進行を抑えるとされている。保護性錆となる目安は施工後3か月～4か月程度だと言われているが、その後絶対に錆が侵食しないとは言えない。

という風に仕分けができていると思われる。

腐食防食協会（1974年設立）よりも早く設立（1970年）された日本ウェザリングテストセンターは、双方の役割を果たすことができる。なお、同センターはJIS Z 2381：大気暴露試験方法通則の原案作成団体となっている。

9.3.1 一般財団法人 日本ウェザリングテストセンター、東京都港区

1970年に設立、大気暴露試験を中心とした耐候性試験を専門とする一般財団法人。国際規格〔ISO/IEC 17025〕に適合した品質の大気暴露試験を実施できる国内唯一の第三者試験機関である。

- 千葉県銚子市、銚子暴露試験場
- 沖縄県宮古島市、宮古島暴露試験場
- 沖縄県宮古島市、宮古島海岸暴露場
- 北海道旭川市、旭川暴露試験場

9.3.2 国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター、茨城県つくば市

以下の施設を持つ。

- 茨城県つくば市、つくば屋外暴露場：温暖な環境、他の厳しい環境の暴露試験場との比較基準。
- 静岡県富士宮市、朝霧屋外暴露場：標高が約900mと高いため、紫外線量が多い。
- 北海道陸別町小利別：日本有数の寒冷地。
- 新潟県糸魚川市：冬季に強い季節風と塩分の影響を受ける。
- 東京都品川区：交通の激しい道路わきに設置。
- 静岡県焼津市沿岸：温帯の海上・海中での暴露。
- 東京都小笠原村沖ノ島島：熱帯での海の影響を強く受ける。
- 沖縄県国頭郡大宜味村：亜熱帯の沿岸で、海の影響を強く受ける。

9.3.3 国立研究開発法人土木研究所

寒地土木研究所、北海道札幌市

以下の施設を持つ。

- 北海道苫小牧市、美々暴露試験場：初代十勝大橋の200年長期耐久性試験
- 北海道増毛郡増毛町、留萌海岸コンクリート暴露試験場：潮風や塩害の影響を調べる。
- 北海道苫小牧市、美々コンクリート・凍害実験場：凍害の影響を試験。

9.3.4 国立研究開発法人建築研究所、茨城県つくば市

以下の施設を持つ。

ばくろ試験場：建築材料部材の耐久性能を解明するため、日光や風雨にさらして実験。材料ばくろ架台、部材ばくろ架台、動ばくろ架台をはじめ、気象条件を把握するための日照時間、日射量、気温、湿度、紫外線量、雨量、風速、試験体表面温度等を計測する機器類等が設置されている。

9.3.5 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

港湾空港技術研究所、神奈川県横須賀市

「海水循環水槽」、「海水シャワー暴露試験場」および「海上大気暴露試験場」の3つの暴露場で構成され、環境区分として「海水中」、「干満帯」、「飛沫帯」および「海上大気中」の4環境を模擬した陸上の屋外暴露試験施設がある。

9.3.6 国立研究開発法人物質・材料研究機構、

茨城県つくば市

大気暴露試験場にて大気腐食データおよび気象因子データを収集している。

9.4 大気暴露試験データの共有・データベース

このように貴重な大気暴露試験データを適切に広く共有できるようにすることが期待されるが、あまり多くの関連事業はないようである。

9.4.1 スガウェザリング技術振興財団、「グローバル大気腐食データベースの構築」

これまで各国の研究機関や公設試験機関をはじめ、さまざまな協会・学会・団体で実施されてきた金属材料の屋外暴露試験（炭素鋼、亜鉛、銅）および屋内暴露試験（炭素鋼、亜鉛、銅、銀、ニッケル、すず）の腐食データを、一元的に抽出したデータベースにま

とめ、頒布している。

第1巻：炭素鋼の屋外暴露、第2巻：亜鉛、銅の屋外暴露、第3巻：各種金属材料の屋内暴露である。

9.4.2 国立研究開発法人物質・材料研究機構、 「大気腐食データシート」の公刊

以下のように事業を進めている。

(1) 材料選定：外部委員を含む検討会で審議した市販材及び溶製した合金材料で製造履歴の明確なもの。試験片は板状とし JIS Z 2381：2001 に準ずる。

(2) 暴露試験

- 直接暴露試験：南面 45° に傾斜させた暴露架台を使用し、試験片を雨、風、日光などの自然環境下に直接暴露。
- 遮へい暴露試験：遮へい構造物の下に暴露架台を水平に設置し、雨、日光の直接の影響を避けた状態で暴露。各試験をつくば、銚子、宮古島の3個所で実施。

(3) 評価項目

- 外観観察：外観の目視観察および試験片の対空面（表）及び対地面（裏）のカラー撮影。
- 断面観察：さびの断面観察のため、埋込み、研磨後、顕微鏡観察。
- 質量測定：1 mg の単位で初期質量、暴露後質量を計量。JIS Z 2383 及び ISO 8407 に記載の方法で腐食生成物の除去処理。
- 腐食度算出：腐食度を一定の式（略）に従って算出。

(4) 今までの発刊実績

- ✓ 低合金鋼：大気腐食特性データシート作成計画（2002年12月25日）
- ✓ Fe-Al、Fe-Si 二元系合金：大気腐食特性データシート（2005年3月31日）
- ✓ Fe-Cr、Fe-Ni 二元系合金：大気腐食特性データシート（2010年3月31日）
- ✓ 炭素鋼：短期繰り返し暴露の大気腐食特性データシート（2011年3月31日）
- ✓ 炭素鋼、耐候性鋼：大気腐食特性データシート（2014年3月31日）
- ✓ Fe-P、Fe-Cu 二元系合金：大気腐食特性データシート（2016年3月31日）
- ✓ 炭素鋼：大気腐食特性データシート－大気環境因子の影響－（2019年3月31日）

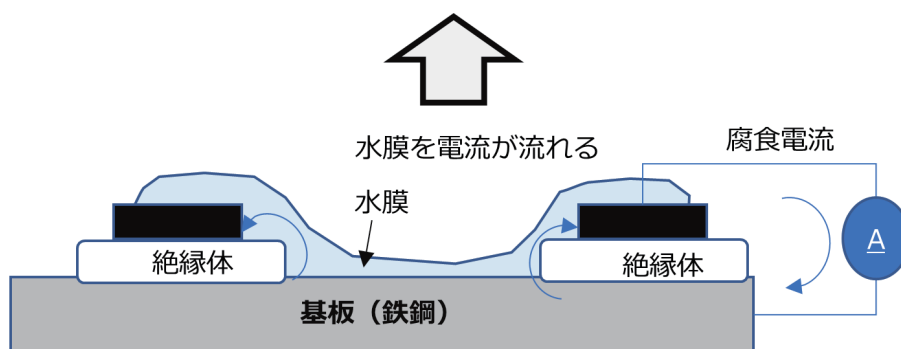
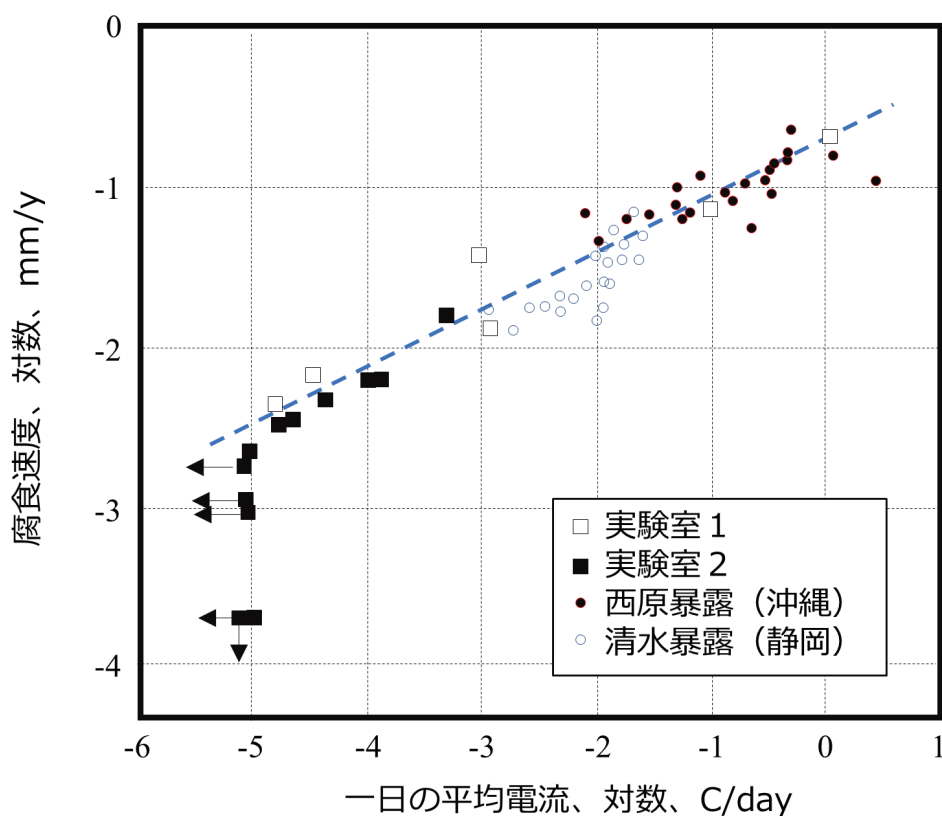
9.5 ACMセンサ (大気腐食モニタリングセンサ)

ACM (Atmospheric Corrosion Monitor) 型腐食センサ (通称 ACM センサ)^{8) 9)} は、1994 年頃、日本で開発された。

大気腐食は水と酸素がないと生じない。酸素も水分も空気中にあるが、水というより金属表面に付いた水膜とする方が分かりやすいだろう。水膜は空気中の水分による結露、雨水による濡れでも形成される。水膜の厚さを変えて腐食反応の度合いを調べた基礎研究によると水膜の厚さによる以下のような現象が観察される。

- 渇き大気腐食：水膜厚さが 10 nm 以下。乾燥大気中と同程度の腐食反応。
- 湿り大気腐食：水膜厚さが 1 μm 以下。水膜が厚くなるとともに腐食速度が増加し、1 μm で最大の腐食速度になる。
- ぬれ大気腐食：水膜厚さが 1 mm 以下。水膜が厚くなると、大気からの酸素供給が低下し、腐食速度が減少する。
- 浸漬腐食：それ以上の厚さの水膜。

したがって、時間変化による積算腐食量は水膜の状態変化に大きく左右される。となると、水膜の状態変化を示すことができる何らかの計測可能な因子 (センサ出力) と腐食量変化 (計測可能) を結びつけること



図表 9.01 炭素鋼での ACM センサの出力 (平均電流) と腐食速度の関係
(文献 10 を参考に、筆者が作成)

ができると任意の自然環境でのセンサ出力から大気腐食量を見積もることができるようになる。

基板となる対象金属（Fe、亜鉛メッキ鋼板など）の表面に、まず絶縁ペーストをスクリーン印刷・焼成硬化し、さらにその上に基板との絶縁が保たれるように導電性ペースト（Ag など）を積層印刷・焼成硬化させる。乾燥状態で両極間の抵抗が 10 MΩ 以上（絶縁状態と見なせる）のものを作る。

これが、大気中に暴露され、降雨や結露などによって基板と導電性ペーストの間に薄い水膜が形成されるとガルバニック電流が流れるようになる。

この電流は腐食速度と良い相関関係があることが、開発者らによる様々な環境での実験で確かめられた（図表 9.01）¹⁰⁾。この図は、鉄の腐食速度（mm/年）と ACM センサの日平均電気量（Q）の間の良い相関関係を示している。横軸の左端側はほぼ乾燥状態なので、腐食は実質ないと見なせる。これらが大気腐食の基準関係と見なすことができると新しい出発点となる。

このセンサをベースに、2019 年に腐食防食学会が原案作成団体となり、JIS に Z 2384：大気腐食モニタリングセンサが制定された。研究面等で既に十分な使用実績があるが、市販されてさらに多方面に適用されている。

9.6 今後の展望

大気腐食については、ヨーロッパでの研究例が乏しいのに比して、日本では早くから大きな問題となっていた。高温・多湿・海塩粒子飛散の自然環境である、インド沿岸部、東南アジア、中国沿岸部などでも共通する課題である。だが、あまりにも複雑な現象であり、長い間攻め込めなかった感が強い。それでも大気腐食による損耗は大きいので、それを減らすために材料の選択・改善および塗装技術の開発の方向性を探って対処してきた。そのために暴露試験を全国規模で展開し、役立ててきた。

このような中で大気腐食モニタリングセンサが開発され、JIS 化されたことは大きな意義を持つ。センサ

は十分小型であり、定置構造物に限らず移動体にも設置可能である。また、24 時間データの有効な解析が進めば、影響因子の絞り込みがより確度を増すだろう。複雑現象の多階層的観察技術がまだまだ十分とは言えないが、ミクロ、メソ、マクロな各階層での観察を統合しながら、より妥当な現象モデルを導き出し、数値シミュレーションも援用し、信頼性を格段に高める展開を近い将来に期待する。

また、センサが国際規格化されていけば、共通課題を持つ国々の間での国際連携も極めて重要になる。その局面で日本には大きな貢献ができるはずである。

参考・引用文献

- 1) 塚本小四郎，張忠一，橋梁構材の腐蝕調査，鐵と鋼，4，(1918)，1172-1184
- 2) 川上義弘，耐錆鋼に關する研究，鐵と鋼，14，(1928)，(I)：838-951，(II)：996-1071
- 3) 山本洋一，金屬材料の腐蝕に就て，機械學會誌，37，(1934)，(前編)：531-545，(後編)：621-635
- 4) 編輯委員，腐食に支払う莫大な金額，防蝕技術資料，1，(1952)，66-72
- 5) 腐食損失調査委員会，わが国における腐食損失調査報告書，防食技術，26，(1977)，401-428
- 6) 腐食コスト調査委員会，わが国の腐食コスト，Zairyo-to-Kankyo，50，(2001)，490-512
- 7) 腐食コスト調査委員会，わが国における腐食コスト，Zairyo-to-Kankyo，69，(2020)，283-306
- 8) 元田慎一，鈴木揚之助，篠原正，兒島洋一，辻川茂男，押川渡，糸村昌祐，福島敏郎，出雲茂人，海洋性大気環境の腐食性評価のための CM 型腐食センサ，Zairyo-to-Kankyo，43，(1994)，550-556
- 9) 篠原正，元田慎一，押川渡，ACM センサによる環境腐食性評価，Zairyo-to-Kankyo，54，(2005)，375-382
- 10) 押川渡，糸村昌祐，篠原正，辻川茂男，雨がかりのない 条件下に暴露された炭素鋼の腐食速度と ACM センサ出力との関係，Zairyo-to-Kankyo，51，(2002)，398-403

定時観測によるデータ記録

極めて長期間にわたる試験において、制御条件を一定に保つか、データをどう計測するかなどで、この50年間にいくつもの大きな発展を経験した。

例えば高温クリープでは、電気炉の温度をどう一定に保つかは難題だった。電氣的な自動制御が可能になる前は、例えば、出力を一定にして、定常となる温度を予め知っておき、頻繁に温度変動を観察し、それに応じて、スライダックで電圧を微調整するとかの工夫がされた。しかし、このやり方で何十年も継続することは可能としても、得られるデータの信頼性が損なわれる危険が高い。筆者自身、目的は違うが、電気炉のPID制御装置を購入して試してみた時、最新技術の恩恵を実感したものである。

ほぼどのような現象も、最初の期間は測定値の変化が大きく、急速に変化速度が低下し、変化がなくなったように感じるが、試験片が破壊する時が近づいてくると、今度は変化率が時間と共に増えるようになる。始めた当初は、頻度良く測定値を読み取り、データブックに記録する。変化がないときは、一日に何回、何時と決めて定時観察、記録する。終わりが近づくことを見逃さないようにして、終盤はまた頻度良く読み取ることになる。だが、いつ、終盤が来るか予測できない。だが不思議なことに、経験が重なってくると、なんとなく予感できるようになる。最近ではAIとか騒ぐが、どうも人間にもそのような能力が潜んでいると思うことがある。というか、まだ論理的な説明はできないが、おぼろげに現象論的な理解ができてくるというべきかと思う。

その後、アナログでの連続記録を一気に放逐するような、デジタルの連続記録がパソコンを利用してできるようになった。解像度は12ビットだったが、工夫すれば十分な精度が得られた。記録容量が高ければまさに24時間、適切な時間間隔で自動的に記録してくれる。1980年代だったと思うが、記録容量が十分でないので、プリンターに印字させることで「自動記録」とした。その後、解像度は16ビットになり、記憶容量はどんどん増えていった。そうすると、文字通りの自動記録が可能になる。

少なくとも長時間実験での人力によるデータ記録を交代制で行う必要はなくなった。しかも、多くの台数の、それが遠隔地にあっても、リアルタイムの監視システムで、データの現状を一気に知ることができる。

このような技術開発を最大限利用するためにも、高い実験精度を持つことこそが肝要だと強く思う。ビッグ・データのそれぞれの要素の精度が十分でないとしたら、それを解析してもある意味無駄だ。高精度のビッグ・データを得て、それを解析しきる中から、新しいサイエンスが生まれてくるような予感がする。

10 | まとめ

信頼性を論じるための前提となる基本認識は、本稿では詳しくは触れなかったが、以下ようになる。

- 均質均一な素材であれば、その素材に固有の限界値を得ることができる。
- 但し、定められた大きさ以上の試験片を確保し、試験片の形状制限を守らなければならない。
- 一方、内部、表面に不均一性や欠陥があれば、限界値はその影響を明白に受ける。したがって、均質均一な素材に寸法、形状が分かった欠陥を意図的に作り込むことができると、その影響を再現性良く計測できる。
- 試験環境、すなわち、温度、雰囲気などの影響を受けるので、試験環境を一定に保つか、その時間変化を正確に把握すべきである。
- 力学的な性質は、変形速度（歪速度）の影響を受けるので、歪速度を記録し、その影響を把握しなければならない。
- 高温では勿論、室温であっても、素材は熱力学的に安定とは言えないので、経年変化があることを前提にしておくといけない。経年変化が実用上で軽微な水準を越える場合は、極めて重要になる。

これらの前提条件を十分に整えることができないと説得力のある試験ができない。これらの前提条件は科学研究と共通するか、それ以上に厳しいものであることは読者には自明だろう。すなわち、信頼性向上技術研究は科学研究の重要な一翼を占め、担っている。この点に関する基本が薄弱だということは、その社会の科学的基盤が薄弱だと断ぜざるを得ない。本稿で見てきた通り、幸い日本の信頼性向上技術研究の水準は世界的に見ても高いのは明らかである。

今後、この基本の共有を広めつつ強化し、さらなる前進を図っていく必要がある。

10.1 日本の鉄鋼の信頼性向上技術研究の特徴

歴史の振り返りから分かった日本の鉄鋼の信頼性向上技術研究の特徴点は、以下ようになる。

- 戦後の出発点で国産技術の世界標準に見合う水準に押し上げることを産学官の統一目標としたことが大きな前進要因となっている。国産技術とは、国産材料に留まらず、世界標準に見合う総合技術としての国産化をいう。

- 学術的には、関連学協会で各分野の観点からの研究、技術開発が旺盛に行われた。
- 試験法の統一を目指した共同事業をまず産が企業の枠を超えて実施し、それが効果的な助走となる。
- 規格の制定、改正に当たっては、官製起案委員会等による官の原案「内製」から学協会プラットフォームによる原案ボトムアップ重視へと変遷し、官の責任下での産学連携の仕組みが機能した。
- 学協会等においては、特に重大事故については高い責任感を持って問題点を自主的に把握する姿勢を歴史的に貫いており、解明事実の公開データベース化もなされている。
- 客観性の高い世界標準に見合う基準データの取得と整備の必要性が痛感され、公的機関に産学官のプラットフォームを作り、公的機関が標準法試験を実施し、その成果を公開・共有する仕組みが機能するようになった。特に公的機関が長期間試験を確実に実施してきた点は、世界的に稀有と言ってよい。その背景には産学官の密接な連携が存在する。
- これらが相まって、日本の鉄鋼の信頼性向上技術は世界的な手本となる水準に到達し、グローバル規格へも影響力を持ち始めている。
- 一方、大気腐食のように欧米では大きな問題とならず、日本独自のアプローチが必要な課題が存在することも早くから認識されていた。気候学的には必然とはいえ驚かされる。このように世界的に「共通しない」ことをどのように世界的に「共通化＝規格化」するかという課題がある。

これらの教訓はすべて今後にも活かすべきである。連携には時間の推移と共に齟齬、分断が生じ、それが拡大し消滅する例がよく見られる。状況の変化に応じ、機敏に連携の目標を見つめ直し、連携への参画者についても見直していかないと継承できない。

10.2 中国の台頭と国際連携

国際規格を考える際には、変化速度の速い世界情勢を見ることが不可欠である。ここでは益々注目度が高まる中国を取り上げてみる。

中国の名目 GDP は 2022 年に約 20 兆米ドルで、日本の約 4 倍である。1990 年以降の日本の経済成長は

小さいので、2010年に追い越されてから10年余りで中国は4倍に成長したことになる。1990年代に「世界最大の製鉄国」になった頃に、次の目標は「世界最強の鉄を作る国」と意気盛んだったことを思い出す。

中国は地理的に日本に近くしかも偏西風の風上に位置するので、中国の大気、海洋の汚染は少なからず日本の広域の自然環境に影響を及ぼす。それに留まらず、経済、食料問題などの中国の動向も世界および日本に大きな影響を及ぼすことを冷静に捉えざるを得ない。鉄鋼をできる限り適切に使い、どんな事故でもその発生と被害を最小化することを望む立場からは、中国の今後がどうなるかに大きな関心を払わざるを得ない。そういう思いから、中国における近年の信頼性向上技術研究に詳しい八木晃一氏へのヒアリングおよび氏の著作物を通じて、中国の現状について貴重な情報を得た。

10.2.1 国家材料服役安全科学中心 (NCMS) の整備プロジェクト^{1) - 3)}

八木氏によるとこの計画は、第11期5カ年計画で位置づけられた12のキー科学技術施設整備の一つとして、2007年2月に国家発展改革委員会が正式に認めたものである。和訳としては「国立材料使用安全科学センター」が適切（八木氏）だろう。建設は2008年12月から開始された。

このセンターは、北京科技大学を中核とし、瀋陽の中国科学院金属研究所、西安の西北工業大学、ハルビン工業大学などの協力で進められているので、中国科学院のネットワーク下のプロジェクトと言える。北京市昌平区に30万m²超の土地を入手、建築面積は10.7万m²である。

このセンターが目指している材料安全研究の領域は広範で、例示すれば以下となる。

- 原子力発電および火力発電プラント用構造材料の力学的性質および材料使用環境での評価
- 石油化学プラント用材料の腐食に及ぼす多相流の影響
- 構造材料の大気腐食の特性評価および寿命予測
- 力学および化学相互作用下での構造材料の適用性の評価
- 極限環境下での航空および海洋用構造材料の特性評価
- 土木分野（道路を含む）での構造材料の特性評価と寿命予測

材料の特性を調べる小型試験機の整備とともに、大型部材（部品）を使って複合的条件下での特性を調べる大型実験施設も整備し、構造材料が被る損傷をシ

ミュレーションするための大型コンピュータも導入する。世界の多くの機関との協力関係も進めており、物質・材料研究機構も協力覚書を結んでいる（2009年7月筆者が現地で覚書に署名した）。

10.2.2 石炭火力に傾倒する中国のエネルギー政策

中国は、一時はその比重を低減する姿勢も見せたが、石炭火力に多くを依存する姿勢を変えず、さらなる増設も視野に入れている。当然、発電プラントの高効率化、長寿命化も狙っている。ここには二つの大きな挑戦課題がある。一つは高性能耐熱鋼の国産化および発電プラントの国産化であり、もう一つは持続可能性の高い、高度な運転・保守・管理技術とそれを支える技術者の育成・確保である。どの課題でも中国は経験が浅いが他国の支援（日本は競合国に先を越されている）も視野に入れ、まずは後者を優先するように見受けられる。その上で国際規格のGrade 92系に重きを置き、その上級鋼の自主開発を目指している。発電機器の国産化については大型部品を除いて国産化が進んでいる。

日本が将来の国際市場でこの分野で寄与しようとするならば、ハード面での高みを活かし、それをさらに伸ばすのは勿論として、ソフト面でも世界的な水準を謙虚に学び、高品質を産み出す日本の特質を生かした運転・保守・管理技術とその人材育成で成果を出すよう考えるべきと思われる。ハード面では、特に大型部品の一品もの製造では高い信頼性を持っており、国際市場への貢献が期待される。

八木氏からのご説明をうかがって上記のような思いを持ったが、その上で日本独自の国際連携戦略がないものかと思い巡らした。信頼性向上技術における産学の良好な連携は日本独自の強さであり、グローバル局面におけるバーゲニング・パワーとして活かせると思う。

10.3 風土へ適合した持続可能性の徹底追及

10.3.1 「使う」場面の安全・安心を強化するために素材・製品の共同・連携を強める

製品規格の中でその原料素材（材料規格）を指定し、必要な性質の測定法（試験規格）を指定するのは自然である。事故等の社会的責任を問う場合、事故の原因を究明して原料素材の破損、損傷が主因であったという場合、素材供給側が①遵守すべき材料規格、試験規

格等に明らかに違反していた場合、②規格等の要求内容には違反していない場合の両方がある。①の場合は明らかに素材供給側の責任が問われるが、これは製品製造の際にチェックが入るべきものである。見落して事故に至ったとすれば製品製造側の責任が問われるのは当然となる。それに対して②の場合は製品製造側が専ら責を負うという方向になっている。これ自体は不当な裁定とは言えない。

しかし、問題解決・再発防止のためには素材供給側の参画が必要な場合が多いはずである。事故防止、撲滅に、素材供給側が無関心になるとしたら、素材そのものの発展の可能性を閉ざしていく懸念が生まれる。本稿でみてきたように、①破損性、損耗性を予め断定的に予測することにリスクがある。②材料強度を上げる（もしくは許容応力を上げる）には、耐破損性、耐損耗性が十分確保されることを保証しなくてはならない（保証できない場合は許容応力を下げるべきである）など、信頼性確保こそが構造物の安全・安心な利用を担保できる。関連規格の許容条件がしかるべく耐破損性・耐損耗性を反映する規定に徹底することを強く提案する。

構造物の素材供給側と製品製造側が腕を組んで、「使う」場面での信頼性確保のためのリスクマネジメントを進め、「使う側」とのリスクコミュニケーションを展開すべきである。そのことが、技術とそれを担う人材のさらなる高度化や新しい展開の契機となるはずである。

10.3.2 グローバル化と自然環境

国際規格は制定委員会での多数決による。この手続きに異論はないが注意すべき点がある。多数派工作のポリティクスのことではない。金属材料が晒される自然環境が国によって違うことへの合理的な対応策が必要である。

強い地震の多発地帯であるか否かで耐震性の要求が違う。一案として想定震度幅が十分広く、各国がそれぞれの対応基準を持てるように合意すればよいかもしれない。耐食性は、温度、湿度、塩分濃度の関数となるので、欧州と東アジアでは求められる基準レベルが全く違う。これも多様な自然環境を前提とした基準を制定し合意すればよいかもしれない。

だが、要求が厳しい自然環境の国に製品を輸出しようとする、自国仕様のものは輸出できず、相手国仕様に合わせて製造しなくてはならない。深刻さによって真剣さも違ってくる。このような場合、深刻さに応じてグループ分けし、グループ内のコンセンサスを得

てグループ間の調整を合理的に行う、例えば、国際的なダブルスタンダードの容認も合理性が高い。生じる摩擦の最小限化に役立つとすれば考慮の余地がある。

このような差異についての理解をお互いに深めていく上では、基礎研究の役割が大きい。現象のメカニズムをより深く追求、解明した研究成果を国際的に共有する努力が求められる。同時に、深刻な課題を解決するのに必要な技術の特許化することも大事である。それによって科学のおよび技術的に対応できていることを具体的に「見える化」して示すことは、相手の理解を得て国際的なコンセンサスを構築する鍵になる。

日本の経済、インフラを自然災害に強く持続可能性の高いものに維持しさらに発展させていくためにもこの戦略は不可欠である。自己防衛の上でのオープンな共創戦略が好都合と思われる。

10.3.3 注目すべき他のテーマ

本稿では、鉄鋼の信頼性向上技術の内、高温クリープ、高サイクル疲労、脆性破壊、大気腐食だけを取り上げたが、大事なテーマはこれらに限られることなく、現状でも多くのテーマが鋭意検討されている。

未来を考えた時に筆者が最も注目すべきと考えているテーマは以下の二つである。

水素社会を展望すれば、鉄鋼と水素の関係の重要度是否が応にも増してくるはずだ。水素による破損促進懸念は高強度になればなるほど増す。材料強度は低温で増すので、水素を低温環境で使う場合は、二重の意味で高強度との闘いが顕在化する。

延性における破壊限界には原理的なブレイクスルーが期待される。高強度かつ高延性な材料の開発は経験論の枠内で活発に行われてきたが、そこから脱して科学的に論理的なものとなることが強く期待される。

これらに関する助走は確かに積み重ねられてきているので、近い将来、大きな前進があると期待する。

10.4 鉄鋼協会設立の初志（1914年）に立ち返る

鉄鋼協会の初代会長は野呂景義（1854年～1923年）、二代目は今泉嘉一郎（1867年～1941年）、三代目は香村小録（1866年～1939年）、そして4代目が俵国一（1872年～1958年）である。鉄鋼協会創立40周年の際に俵が設立余話を回顧⁴⁾している。

将来歴代の会長となる4名が集まって鉄鋼協会の設立について相談した。曰く、『大正3（1914）年6月8日今泉嘉一郎、俵国一、野呂景義、香村小録の4名会

合し我国において鉄および鋼に関する事業の発達を助成する目的を以て1つの協会を組織せんと欲し協議の結果

- (イ) 機関雑誌を発行すること
- (ロ) 協会の発展に伴い理化学的試験所および参考品陳列所を設置すること
- (ハ) 学術上および経済上時宜に適する研究調査をなすこと

会員の資格を鉄鉱採掘業者、鉄鋼製造業者およびその加工者、鉄鋼使用者、鉄鋼販売者ならびにこれらに関する技術者および従業者その他鉄鋼に関係ある特志者とするのと一応決定したのである』

4名の中の大先輩である野呂の提案がベースになっているということだが、4名はそれぞれ海外視察もしていて欧米の情勢にも通じていた。例えばドイツでは、鉄鋼研究所を1917年に設立、ドイツ博物館を1903年に提唱、1925年に一般開館の機運があったことも何らかの影響を与えているかもしれない。いささか牽強附会かもしれないが、「理化学的試験所の設置」が「金属材料技術研究所の設置」の発端的底流となったのかもしれない。

4名の初志で、現代及びこれからのに通じるのではないかと感心するのは、会員資格と組織名である。依はこの点について、以下のように回顧している。

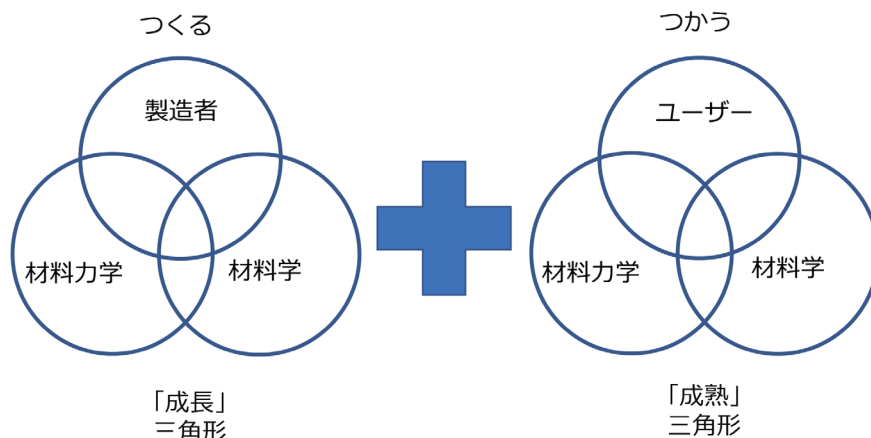
『本協会会則の特色と思うことは会員の資格である。鉄鋼製造者は勿論のこと、それに鉄鋼販売者の外鉄鋼使用者を含めたこと、(中略)、主として鉄の使用者、需用家の協力なしには成り立たない理に基ずくと考える。これは飽迄心して貰い度い、製鉄業のような各種専門家の総合技術を必要とするものでは是非心得えねばならぬと思考する。そんな意味を含めて学会といわ

ず協会と唱えるようになった筈である』と述べている。「協会」と名付けたのは、「鉄の使用者、需要家」の協力を得るためだと言い切っている。

翻って見ると、名称、会員資格の初志が鉄鋼協会において十分達成されているとは思えない。むしろ、これから未来を展望する際にこそ傾聴すべき問題提起と捉えることもできる。本稿での検討の結果、鉄鋼の信頼性向上研究は、作る側が使う側、究極的には市民、社会と連携しないと成功できないと結論付けたが、実は、その点は一世紀以上も前に既に先人たちが見越していたことに驚愕する。改めて先人たちの初志を受け止める時代がやってきたと思う。

10.5 終わりに

鉄鋼の信頼性向上技術には、まず材料力学と材料学の連携が不可欠である。技術の成長期では製造者がかかわる三角形が大きな役割を果たすが、技術の成熟期では需要家もしくは使用者がかかわる三角形も重視しなくてはならない。この二つの三角形が有機的につながれば、より安全・安心で豊かな社会の持続性が確保されるだろう。その上に、倫理、法律、保険・金融などの自然科学以外の諸科学との連携も不可欠である。そのような多様な連携を意味あるものにしていくためには、これらを切り結ぶ役目を果たすべき学協会、公的研究機関などによるプラットフォーム活動が重要になる。その展開によって、計算科学・データ科学の活用、自然環境の多様性を入れ込んだ国際基準の制定などの力強い取り組みが結実していくと確信する。



図表 10.01 「つくる」「成長」の三角形（連携）と「つかう」「成熟」の三角形の両方が大事（筆者作成）

参考・引用文献

- 1) 八木晃一，中国で材料安全研究のための新たな拠点が立ち上がる，CROSS T&T, No.36, (2010 年 9 月), 27-29
- 2) 八木晃一，NIMS クリープデータシートの経緯と成果、耐熱金属材料委員会研究報告、日本学術振興会耐熱金属材料第 123 委員会, 58, 3, (2017), 249-258
- 3) 八木晃一，中国の石炭火力発電プラントの状況と課題，私信，(2021 年 3 月 20 日)
- 4) 俵国一，日本鉄鋼協会設立当時の回顧，41, (1955), 680-682

謝辞

執筆にあたり、助言および資料提供いただいた方々に感謝します。

藤田利夫（東京大学名誉教授）

柴田浩司（東京大学名誉教授）

友田 陽（茨城大学名誉教授）

八木晃一（コンサルタント、元物質・材料研究機構
材料基盤情報ステーション長、北京科技
大学国家材料服役安全科学中心高級顧問）

木村一弘（物質・材料研究機構 構造材料研究拠点長）

澤田浩太（物質・材料研究機構 構造材料研究拠点
プラットフォーム長）

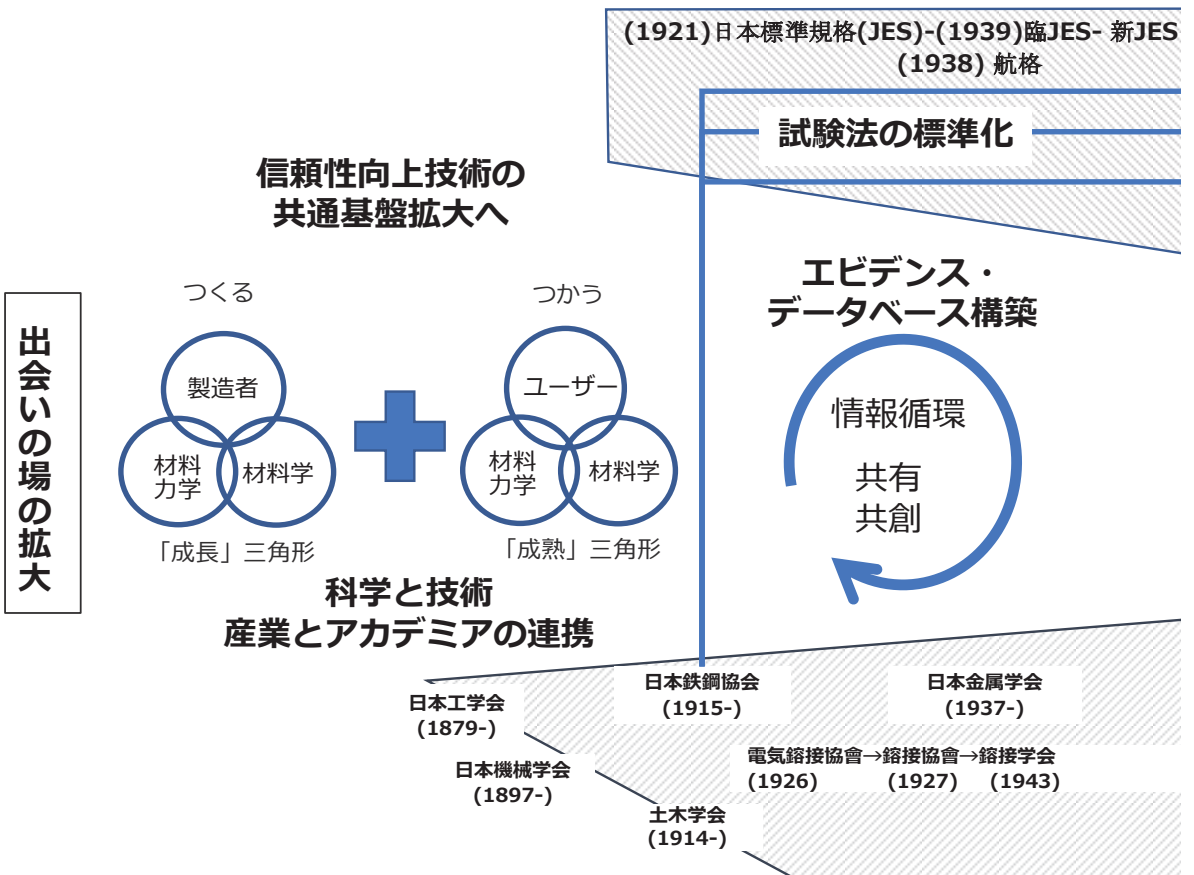
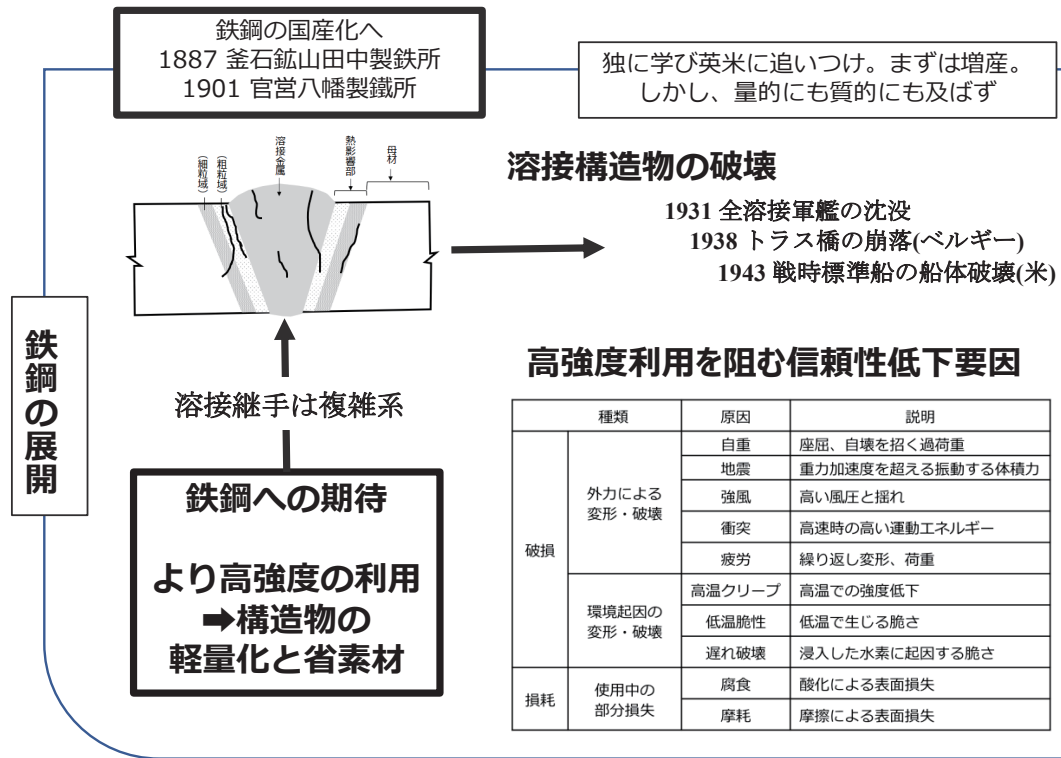
一般社団法人日本高圧力技術協会

一般社団法人溶接学会

国立研究開発法人物質・材料研究機構

鉄鋼の信頼性向上技術研究の系統図

1900-1950



1950-2000

2000-

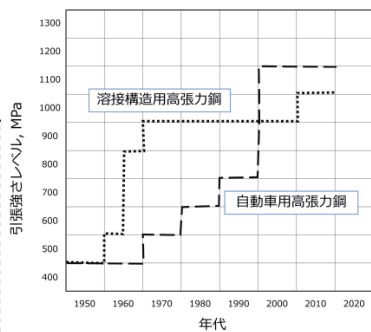
欧米に学び、追いつけ、追い越せ。
量的にも質的にもグローバルリーダーへ

より高い信頼性の
鉄鋼の供給と利用へ

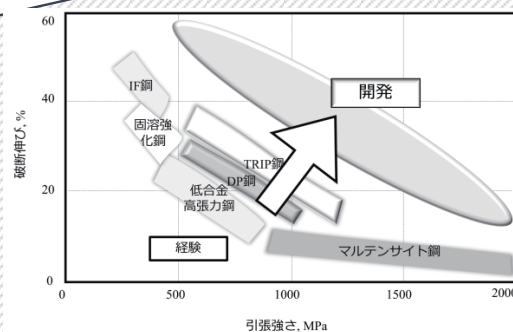
1968 球形貯槽タンク破損
1974 陸上貯蔵タンクから重油流出
1975 原子力発電装置配管の応力腐食割れ
1980 浮体構造物破損(北海)

1995 阪神・淡路大震災
2011 東日本大震災

使える高強度の拡大

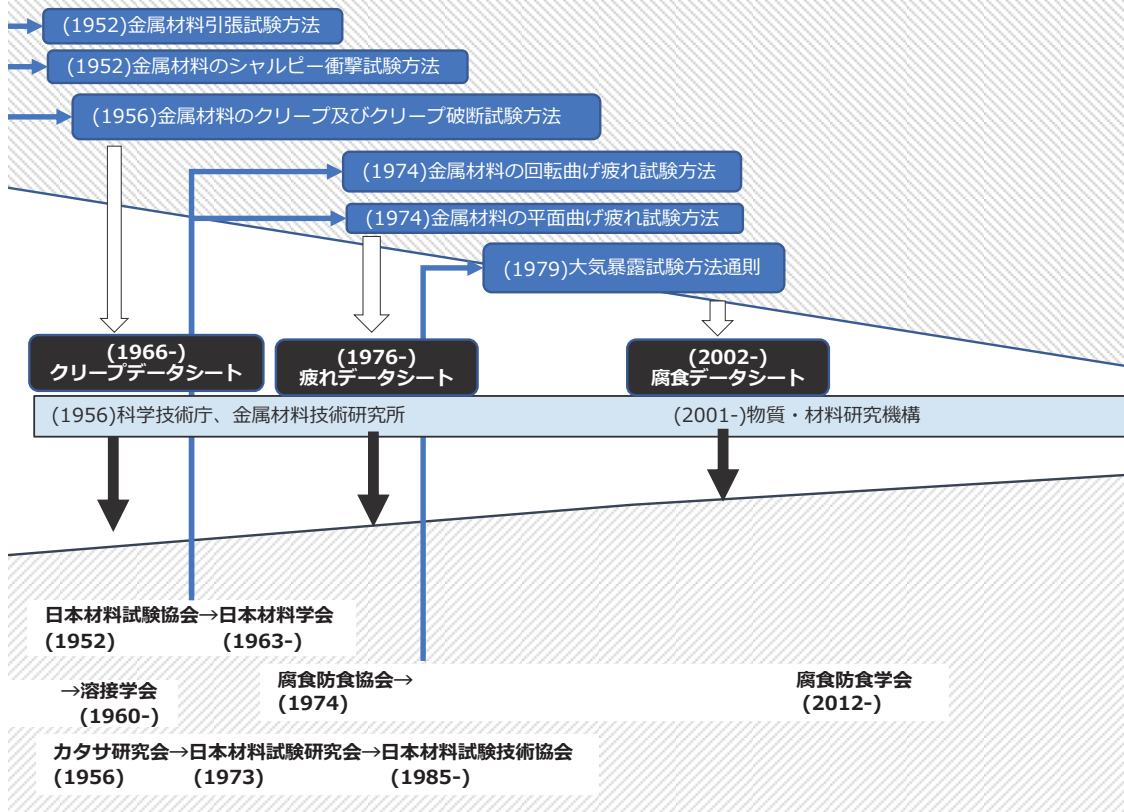


絶え間ない耐破損性・耐損耗性向上



-(1949-2019)日本工業規格 (JIS)

-(2019-)日本産業規格 (JIS)



鉄鋼材料の信頼性向上技術の系統化調査 産業技術史資料 所在確認

番号	名称	制作年	製作者	所有者	所在地	選定理由	備考
1	鉄鋼協会「クリープ委員会」関連の議事録及び議事資料	昭和 40年～昭和 41年	日本鉄鋼協会	物質・材料研究機構	305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1	産官学が連携し、クリープデータシート事業の発足に至った経緯を示す貴重な資料	
2	「構造材料データシート」バックナンバー	昭和 41年以降現在に至る	物質・材料研究機構			世界的に資料価値の高いクリープ、疲労、腐食などのデータシートは適宜更新されているので、バックナンバーがあればその改訂経緯もフォローできる。	Pdf版が公開されている

クリープデータシート

No.	名 称	発刊年
0	国産高温用材料のクリープデータシート試験プログラム	1972
1B	ボイラ・熱交換器用クロムモリブデン鋼鋼管 STBA 22(1Cr-0.5Mo)のクリープデータシート	1996
2B	ボイラ・熱交換器用クロムモリブデン鋼管 STBA 23(1.25Cr-0.5Mo-Si)のクリープデータシート	2001
3B	ボイラ・熱交換器用合金鋼管 STBA 24(2.25Cr-1Mo)のクリープデータシート	1986
4B	ボイラ・熱交換器用ステンレス鋼管 SUS 304H TB(18Cr-8Ni)のクリープデータシート	1986
5B	ボイラ・熱交換器用ステンレス鋼管 SUS 321H TB(18Cr-10Ni-Ti)のクリープデータシート	1987
6B	ボイラ・熱交換器用ステンレス鋼管 SUS 316H TB(18Cr-12Ni-Mo)のクリープデータシート	2000
7B	ボイラ・熱交換器用炭素鋼鋼管 STB 410(0.2C)のクリープデータシート	1992
8B	ボイラ・熱交換器用モリブデン鋼鋼管 STBA 12(0.5Mo)のクリープデータシート	1991
9B	蒸気タービンロータ用クロムモリブデンバナジウム鋼 ASTM A470-8(1Cr-1Mo-0.25V)のクリープデータシート	1990
10B	タービンプレード用耐熱鋼棒 SUH 616-B(12Cr-1Mo-1W-0.3V)のクリープデータシート	1998
11B	ボイラ及び圧力容器用クロムモリブデン鋼鋼板 SCMV 4 NT(2.25Cr-1Mo)のクリープデータシート	1997
12B	ボイラ・熱交換器用クロムモリブデン鋼鋼管 STBA 25(5Cr-0.5Mo)のクリープデータシート	1992
13B	タービンプレード用ステンレス鋼棒 SUS 403-B(12Cr)のクリープデータシート	1994
14B	熱間圧延ステンレス鋼板 SUS 316-HP(18Cr-12Ni-Mo)のクリープデータシート	1988
15B	ステンレス鋼棒 SUS 316-B(18Cr-12Ni-Mo)のクリープデータシート	1988
16B	リフォーマー用耐熱鋼遠心力鋳鋼管 SCH 22-CF(25Cr-20Ni-0.4C)のクリープデータシート	1990
17B	ボイラ及び圧力容器用炭素鋼鋼板 SB 480(0.3C)のクリープデータシート	1994
18B	ボイラ及び圧力容器用マンガンモリブデンニッケル鋼 SBV 2(1.3Mn-0.5Mo-0.5Ni)のクリープデータシート	1987
19B	ボイラ・熱交換器用クロムモリブデン鋼鋼管 STBA 26(9Cr-1Mo)のクリープデータシート	1997
20B	ボイラ・熱交換器用クロムモリブデン鋼鋼管 STBA 20(0.5Cr-0.5Mo)のクリープデータシート	1994
21B	ボイラ及び圧力容器用クロムモリブデン鋼鋼板 SCMV 3 NT(1.25Cr-0.5Mo-Si)のクリープデータシート	1994
22B	ガスタービンディスク用鉄基耐熱合金 Iron based 15Cr-26Ni-1.3Mo-2.1Ti-0.3V のクリープデータシート	1993
23B	ガスタービンプレード用鉄基耐熱合金 Iron based 20Cr-20Ni-20Co-4W-4Mo-4(Nb+Ta)のクリープデータシート	1989

No.	名 称	発刊年
24B	ガスタービンプレード用ニッケル基耐熱合金 Nickel based 15Cr-28Co-4Mo-2.5Ti-3Al のクリープデータシート	1989
25B	圧力容器用 590 MPa 級高張力鋼鋼板のクリープデータシート	1994
26B	熱交換器用継目無ニッケルクロム鉄合金管 NCF 800H TB (Fe based 21Cr-32Ni-Ti-Al) のクリープデータシート	1998
27B	耐食耐熱超合金 NCF 800H-P (Fe based 21Cr-32Ni-Ti-Al) のクリープデータシート	2000
28B	ボイラ・熱交換器用ステンレス鋼 SUS 347H TB (18Cr-12Ni-Nb) のクリープデータシート	2001
29B	ガスタービンプレード用ニッケル基耐熱合金 Nickel based 13Cr-4.5Mo-0.75Ti-6Al-2.3(Nb+Ta)-Zr-B のクリープデータシート	1990
30B	ガスタービンプレード用コバルト基耐熱合金 Cobalt based 25Cr-10Ni-7.5W-B のクリープデータシート	1988
31B	タービンケーシング用クロムモリブデンバナジウム鋼 ASTM A356/A356M-9 (1Cr-1Mo-0.25V) のクリープデータシート	1994
32A	熱間圧延ステンレス鋼板 SUS 304-HP (18Cr-8Ni) 母材、溶接金属及び溶接継手のクリープデータシート	1995
33A	ガスタービンプレード用鉄基耐熱合金 [Fe based 21Cr-20Ni-20Co-3Mo-2.5W-(Nb+Ta)-N] のクリープデータシート	1999
34B	ガスタービンプレード用ニッケル基耐熱合金 Nickel based 19Cr-18Co-4Mo-3Ti-3Al-B のクリープデータシート	1993
35B	ボイラ及び圧力容器用クロムモリブデン鋼鋼板 SCMV 2 NT (1Cr-0.5Mo) のクリープデータシート	2002
36B	圧力容器用焼入れ焼戻しクロムモリブデン鋼鋼板 ASTM A542/A542M (2.25Cr-1Mo) のクリープデータシート	2003
37A	耐熱鋼 SCH 13 (25Cr-12Ni-0.4C) のクリープデータシート	1992
38A	耐熱鋼遠心力鋼管及びブロック SCH 24 (25Cr-35Ni-0.4C) のクリープデータシート	1991
39A	耐食耐熱超合金 NCF 750-B (Nickel based 15.5Cr-2.5Ti-0.7Al-1Nb-7Fe) のクリープデータシート	1992
40A	ボイラ・熱交換器用炭素鋼鋼管 STB 510 (0.2C-1.3Mn) のクリープデータシート	2000
41A	耐食耐熱超合金棒 NCF 600-B、耐食耐熱超合金板 NCF 600-P 及び熱交換器用継目無ニッケルクロム鉄合金管 NCF 600 TB (Nickel based 15.5Cr-8Fe) のクリープデータシート	1999
42	熱間圧延ステンレス鋼板 SUS 316-HP (18Cr-12Ni-Mo) のリラクセーションデータシート	1996
43A	ボイラ・熱交換器用クロムモリブデン鋼鋼管 ASME SA-213/SA-213M Grade T91 (9Cr-1Mo-V-Nb)、ボイラ及び圧力容器用クロムモリブデン鋼鋼板 ASME SA-387/SA-387M Grade 91 (9Cr-1Mo-V-Nb) 及び高温配管用クロムモリブデン鋼シームレス鋼管 ASME SA-335/SA-335M Grade P91 (9Cr-1Mo-V-Nb) のクリープデータシート	2014
44	高温用合金鋼ボルト材 1Cr-0.5Mo-0.25V 鋼 及び 12Cr-1Mo-1W-0.25V 鋼のリラクセーションデータシート	1997
45A	熱間圧延ステンレス鋼板 SUS 316-HP (18Cr-12Ni-Mo-middle N-low C) 母材、溶接金属及び溶接継手のクリープデータシート	2005
46A	発電ボイラー用合金鋼鋼管 火 STBA 27 (9Cr-2Mo) のクリープデータシート	2005
47	耐食耐熱超合金棒 NCF 800H-B (Fe based 21Cr-32Ni-Ti-Al) のリラクセーションデータシート	1999
48B	発電ボイラー用合金鋼鋼管 ASME SA-213/SA-213M Grade T92 (9Cr-0.5Mo-1.8W-V-Nb) 及び発電配管用合金鋼鋼管 ASME SA-335/SA-335M Grade P92 (9Cr-0.5Mo-1.8W-V-Nb) のクリープデータシート	2018
49A	ガスタービン用ニッケル基耐熱合金 Nickel based 16Cr-8.5Co-3.5Al-3.5Ti-2.6W-1.8Mo-0.9Nb のクリープデータシート	2012
50A	クリープデータシート最終版発行後に取得した長時間クリープ破断データ	2015
51B	発電配管用ステンレス鋼管 火 SUS 410J3 TP (11Cr-2W-0.4Mo-1Cu-Nb-V)、発電用ステンレス鋼板 火 SUS 410J3 (11Cr-2W-0.4Mo-1Cu-Nb-V) 及び発電ボイラーステンレス鋼管 火 SUS 410J3 TB (11Cr-2W-0.4Mo-1Cu-Nb-V) のクリープデータシート	2020
52B	発電ボイラー用ステンレス鋼管 火 SUS 410J3 DTB (12Cr-2W-0.4Mo-1Cu-Nb-V) のクリープデータシート	2021
53	高温圧力容器用高強度クロムモリブデン鋼鍛鋼品 JIS SFVCM F22V (2.25Cr-1Mo-0.3V) のクリープデータシート	2007
54A	発電用ボイラー用合金鋼鋼管 火 STBA24J1 (2.25Cr-1.6W) 及び発電配管用合金鋼鋼管 火 STPA24J1 (2.25Cr-1.6W) のクリープデータシート	2016

No.	名 称	発刊年
55	ニッケル合金板 NW6002(Nickel based 21Cr-18Fe-9Mo) 及びニッケル合金棒 NW6002(Nickel based 21Cr-18Fe-9Mo) のクリープデータシート	2008
56A	発電ボイラー用ステンレス鋼管 火 SUS304J1HTB(18Cr-9Ni-3Cu-Nb-N) のクリープデータシート	2018
57A	ボイラ・熱交換器用ステンレス鋼管 ASME SA-213/SA-213M Grade TP347HFG(18Cr-10Ni-Nb) のクリープデータシート	2017
58	発電ボイラー用ステンレス鋼管 火 SUS310J1 TB(25Cr-20Ni-Nb-N) のクリープデータシート	2011
59	耐食耐熱超合金棒 JIS NCF 718-B(Nickel based 19Cr-18Fe-3Nb-5Ti-Al) のクリープデータシート	2011

注 (No. に付したアルファベットの意味) :

数字のみの初版 : 約 1 万時間まで、A 版 : 約 3 万時間～5 万時間まで、B 版 : >10 万時間。

ただし初版の内容は A 版に、A 版の内容は B 版に吸収される。

疲労データシート

No.	名 称	発刊年
0	国産実用金属材料の疲れデータシート作成計画	1978
1	機械構造用炭素鋼 S25C (0.25C) の疲れ特性データシート	1978
2	機械構造用炭素鋼 S35C (0.35C) の疲れ特性データシート	1978
3	機械構造用炭素鋼 S45C (0.45C) の疲れ特性データシート	1978
4	機械構造用炭素鋼 S55C (0.55C) の疲れ特性データシート	1978
5	溶接構造用圧延鋼 SM50B 突合せ溶接継手の疲れ特性データシート	1978
6	タービンプレード用ステンレス鋼 SUS403-B(12Cr) の高温高サイクル疲れ特性データシート	1978
7	圧力容器用クロムモリブデン鋼 SCM4V 4(2.25Cr-1Mo) の高温低サイクル疲れ特性データシート	1978
8	機械構造用合金鋼 SCr440(0.40C-1Cr) の疲れ特性データシート	1979
9	機械構造用合金鋼 SCM435(0.35C-1Cr-0.2Mo) の疲れ特性データシート	1979
10	機械構造用合金鋼 SCM440(0.40C-1Cr-0.2Mo) の疲れ特性データシート	1979
11	溶接構造用圧延鋼 SM58Q 突合せ溶接継手の疲れ特性データシート—試験片寸法の効果—	1979
12	溶接構造用 800N/mm ² 級高張力鋼突合せ溶接継手の疲れ特性データシート—試験片寸法の効果—	1979
13	溶接構造用圧延鋼 SM50B リブ十字すみ肉溶接継手の疲れ特性データシート—試験片寸法の効果—	1979
14	機械構造用炭素鋼 S45C (0.45C) の高温高サイクル疲れ特性データシート	1979
15	熱間圧延ステンレス鋼板 SUS316-HP(18Cr-12Ni-2Mo) の高温高サイクル及び低サイクル疲れ特性データシート	1979
16	機械構造用合金鋼 SMn438(0.38C-1.5Mn) の疲れ特性データシート	1980
17	機械構造用合金鋼 SMn443(0.43C-1.5Mn) の疲れ特性データシート	1980
18	溶接構造用圧延鋼 SM50B 十字溶接継手の疲れ特性データシート —試験片寸法の効果—	1980
19	溶接構造用 800N/mm ² 級高張力鋼突合せ溶接継手の疲れ特性データシート—溶接法の効果—	1980
20	溶接構造用圧延鋼 SM50B リブ十字すみ肉溶接継手の疲れ特性データシート—溶接法の効果—	1980
21	溶接構造用圧延鋼 SM50B 突合せ溶接継手の疲れき裂伝ば特性データシート —溶接法の効果—	1980
22	ボイラ及び圧力容器用炭素鋼 SB49 の高温低サイクル疲れ特性データシート	1980

No.	名 称	発刊年
23	機械構造用合金鋼 SCM435 (0.35C-1Cr-0.2Mo) の高温高サイクル疲れ特性データシート	1980
24	機械構造用合金鋼 SNC631 (0.31C-2.7Ni-0.8Cr) の疲れ特性データシート	1981
25	機械構造用合金鋼 SNCM439 (0.39C-1.8Ni-0.8Cr-0.2Mo) の疲れ特性データシート	1981
26	機械構造用合金鋼 SNCM447 (0.47C-1.8Ni-0.8Cr-0.2Mo) の疲れ特性データシート	1981
27	溶接構造用圧延鋼 SM50B 突合せ溶接継手の疲れ特性データシート—溶接法の効果—	1981
28	圧力容器用クロムモリブデン鋼 SCMV 3 (1.25Cr-0.5Mo) の高温低サイクル疲れ特性データシート	1981
29	機械構造用ステンレス鋼棒 SUS430 (17Cr) の疲れ特性データシート	1982
30	機械構造用ステンレス鋼棒 SUS403 (12Cr) の疲れ特性データシート	1982
31	溶接構造用 800N/mm ² 級高張力鋼突合せ溶接継手の疲れき裂伝ば特性データシート—溶接法の効果—	1982
32	耐食耐熱超合金棒 NCF800H (Fe-21Cr-32Ni-Ti-Al) の高温高サイクル疲れ特性データシート	1982
33	機械構造用ステンレス鋼棒 SUS304 (18Cr-8Ni) の疲れ特性データシート	1983
34	ボイラー及び圧力容器用炭素鋼板 SB42 突合せ溶接継手の疲れ特性データシート—応力比の効果—	1983
35	耐熱鋼棒 SUH616-B (12Cr-1Mo-1W-0.3V) の高温高サイクル疲れ特性データシート	1983
36	耐食耐熱超合金棒 NCF800H-B (Fe-21Cr-32Ni-Ti-Al) の高温時間依存低サイクル疲れ特性データシート	1983
37	機械構造用肌焼鋼 SCr420 (0.20C-1Cr) の疲れ特性データシート	1984
38	機械構造用炭素鋼 S25C (0.25C) の低サイクル疲れ特性データシート	1984
39	機械構造用炭素鋼 S35C (0.35C) の低サイクル疲れ特性データシート	1984
40	圧力容器用炭素鋼板 SPV50 突合せ溶接継手の疲れ特性データシート—応力比の効果—	1984
41	ボイラー及び圧力容器用炭素鋼板 SB42 突合せ溶接継手の疲れき裂伝ば特性データシート—応力比の効果—	1984
42	熱間圧延ステンレス鋼板 SUS304-HP (18Cr-8Ni) の高温高サイクル疲れ特性データシート	1984
43	機械構造用肌焼鋼 SCM420 (0.20C-1Cr-0.2Mo) の疲れ特性データシート	1985
44	機械構造用炭素鋼 S45C (0.45C) の低サイクル疲れ特性データシート	1985
45	機械構造用炭素鋼 SCr440 (0.40C-1Cr) の低サイクル疲れ特性データシート	1985
46	圧力容器用鋼板 SPV50 (Si-Mn, 500N/mm ² YS) 突合せ溶接継手の疲れき裂伝ば特性データシート—応力比の効果—	1985
47	圧力容器用鋼板 SPV50 (Si-Mn, 500N/mm ² YS) 溶接金属及び熱影響部の疲れ特性データシート	1985
48	圧力容器用クロムモリブデン鋼 SCMV 4 (2.25Cr-1Mo) の高温高サイクル疲れ特性データシート	1985
49	熱間圧延ステンレス鋼板 SUS304-HP (18Cr-8Ni) の高温時間依存低サイクル疲れ特性データシート	1985
50	機械構造用肌焼鋼 SNCM220 (0.20C-0.5Ni-0.5Cr-0.2Mo) の疲れ特性データシート	1986
51	機械構造用肌焼鋼 SNCM420 (0.20C-1.8Ni-0.5Cr-0.2Mo) の疲れ特性データシート	1986
52	機械構造用合金鋼 SCM435 (0.35C-1Cr-0.2Mo) の低サイクル疲れ特性データシート	1986
53	熱間圧延ステンレス鋼板 SUS304-HP (18Cr-8Ni) 突合せ溶接継手の疲れ特性データシート —応力比の効果—	1986
54	熱間圧延ステンレス鋼板 SUS304-HP (18Cr-8Ni) 突合せ溶接継手の疲れき裂伝ば特性データシート —応力比の効果—	1986
55	タービンロータ用クロムモリブデンバナジウム鋼 ASTM A470-8 (1Cr-1Mo-0.25V) の高温高サイクル疲れ特性データシート	1986
56	機械構造用合金鋼 SNCM439 (0.39C-1.8Ni-0.8Cr-0.2Mo) の低サイクル疲れ特性データシート	1987
57	ボイラー及び圧力容器用炭素鋼 SB42 (C-Si, 420N/mm ² TS) 溶接金属及び熱影響部の疲れ特性データシート	1987

No.	名 称	発刊年
58	タービンロータ用クロムモリブデンバナジウム鋼 ASTM A470-8 (1Cr-1Mo-0.25V) の高温時間依存低サイクル疲労特性データシート	1987
59	ばね鋼 SUP7 (2.0Si-0.8Mn) の高サイクル疲労特性データシート	1988
60	ばね鋼 SUP9A (0.8Mn-0.8Cr) の高サイクル疲労特性データシート	1989
61	アルミニウム合金板 A5083P-O (Al-4.5Mg-0.6Mn) の低サイクル疲労特性データシート	1989
62	圧力容器用クロムモリブデン鋼 SCMV 4 (2.25Cr-1Mo) の高温時間依存低サイクル疲労特性データシート	1989
63	ばね鋼 SUP12 (1.4Si-0.7Cr) の高サイクル疲労特性データシート	1990
64	アルミニウム合金板 A5083P-O (Al-4.5Mg-0.6Mn) 突合せ溶接継手の疲労特性データシート	1990
65	熱間圧延ステンレス鋼板 SUS304-HP (18Cr-8Ni) 突合せ溶接継手の溶接金属及び母材の疲労特性データシート	1990
66	ボイラ及び圧力容器用炭素鋼 SB46 の中温高サイクル疲労特性データシート	1990
67	ボイラ及び圧力容器用炭素鋼 SB450 の溶接金属及び母材の中温低サイクル疲労特性データシート	1991
68	耐熱鋼棒 SUH616-B (12Cr-1Mo-1W-0.3V) の高温時間依存低サイクル疲労特性データシート	1991
69	工具鋼 SKD61 (0.36C-5Cr-1.25Mo-1V) の高サイクル疲労特性データシート	1992
70	アルミニウム合金押出形材 A7N01S-T5 (Al-4.6Zn-1.2Mg) の低サイクル疲労特性データシート	1992
71	アルミニウム合金押出形材 A7N01S-T5 (Al-4.6Zn-1.2Mg) の突合せ溶接継手の疲労特性データシート	1992
72	ボイラ及び圧力容器用クロムモリブデン鋼 SCMV2-2NT (1Cr-0.5Mo) の中温高サイクル疲労特性データシート	1992
73	工具鋼 SKD11 (1.5C-12Cr-1Mo-0.35V) の高サイクル疲労特性データシート	1993
74	アルミニウム合金板 A7N01P-T6 (Al-4.5Zn-1.5Mg) の低サイクル疲労特性データシート	1993
75	ボイラ及び圧力容器用クロムモリブデン鋼 SCMV2-2NT (1Cr-0.5Mo) 突合せ溶接継手の中温疲労特性データシート	1993
76	アルミニウム合金板 A7N01P-T6 (Al-4.5Zn-1.5Mg) の突合せ溶接継手の疲労特性データシート	1993
77	ボイラ及び圧力容器用クロムモリブデン鋼 SCMV2-2NT (1Cr-0.5Mo) の溶接金属及び母材の中温低サイクル疲労特性データシート	1993
78	圧力容器用クロムモリブデン鋼 ASTM A387 Grade 91 (9Cr-1Mo) の高温時間依存低サイクル疲労特性データシート	1993
79	ボイラ及び圧力容器用炭素鋼 SB450 突合せ溶接継手の中温疲労特性データシート	1994
80	アルミニウム合金押出形材 A6N01S-T5 (Al-0.6Mg-0.65Si) の突合せ溶接継手の疲労特性データシート	1994
81	ボイラ及び圧力容器用クロムモリブデン鋼 SCMV2-2NT (1Cr-0.5Mo) 突合せ溶接継手の中温疲労き裂伝ば特性データシート	1994
82	ボイラ及び圧力容器用炭素鋼 SB450 突合せ溶接継手の中温疲労き裂伝ば特性データシート	1994
83	鋼の弾性係数データシート	1994
84	金属材料技術研究所疲労データシート 目録	1994
85	チタン合金 Ti-6Al-4V (900MPa 級) の疲労特性データシート	2000
86	フェライト系耐熱鋼 (12Cr-2W) の長期高温低サイクル疲労特性データシート	2000
87	ばね鋼 SUP7 (2.0Si-0.8Mn) のギガサイクル疲労特性データシート	2002
88	フェライト系耐熱鋼 (9Cr-2W) の長期高温低サイクル疲労特性データシート	2002
89	チタン合金 Ti-6Al-4V (1100MPa 級) の疲労特性データシート	2002
90	溶接構造用圧延鋼 SM570Q 荷重非伝達すみ肉溶接継手の疲労特性データシート—残留応力の効果—	2002
91	溶接構造用圧延鋼 SM490B 荷重非伝達すみ肉溶接継手の疲労特性データシート—残留応力の効果—	2003

No.	名 称	発刊年
92	Ti-6Al-4V チタン合金(900MPa 級)のギガサイクル疲労特性データシート	2003
93	ばね鋼 SUP7(2.0Si-0.8Mn)の超音波疲労特性データシート	2004
94	ボイラ及び压力容器用クロムモリブデン鋼 SCM4V(2.25Cr-1Mo)の長期高温低サイクル疲労特性データシート	2004
95	純チタンの疲労特性データシート	2004
96	溶接構造用圧延鋼 SM490B 荷重非伝達すみ肉溶接継手の疲労特性データシート—板厚の効果(その1, 板厚 9mm)—	2004
97	炭素鋼 S40C (0.40C) のギガサイクル疲労特性データシート	2005
98	チタン合金 Ti-6Al-4V (1100MPa 級) のギガサイクル疲労特性データシート	2005
99	溶接構造用圧延鋼 SM490B 荷重非伝達すみ肉溶接継手の疲労特性データシート—板厚の効果(その2, 板厚 160mm)—	2006
100	熱間圧延ステンレス鋼板 SUS310S (25Cr-20Ni) の長期高温低サイクル疲労特性データシート	2006
101	チタン合金 Ti-6Al-4V ELI(900MPa 級)の疲労特性データシート	2006
102	炭素鋼 S40C (0.40C) の超音波疲労特性データシート	2007
103	チタン合金 Ti-6Al-4V ELI(1100MPa 級)の疲労特性データシート	2007
104	機械構造用合金鋼 SCM440(0.40C-1Cr-0.2Mo)のギガサイクル疲労特性データシート	2008
105	チタン合金 Ti-6Al-4V ELI(900MPa 級)のギガサイクル疲労特性データシート	2008
106	機械構造用合金鋼 SCM440(0.40C-1Cr-0.2Mo)の超音波疲労特性データシート	2009
107	チタン合金 Ti-6Al-4V ELI(1100MPa 級)のギガサイクル疲労特性データシート	2009
108	溶接構造用圧延鋼 SM490B 荷重非伝達すみ肉溶接継手の疲労特性データシート—板厚の効果(その3, 板厚 80mm)—	2009
109	耐食耐熱超合金板 NCF800H (21Cr-32Ni-Ti-Al) 長期高温低サイクル疲労特性データシート	2010
110	マグネシウム合金押し出し材 AZ61 (Mg-6Al-1Zn) と AZ31 (Mg-3Al-1Zn) の疲労特性データシート	2010
111	チタン合金 Ti-6Al-4V (900MPa 級) の高応力比側ギガサイクル疲労特性データシート	2010
112	軸受鋼 SUJ2(1.0C-1.5Cr)のギガサイクル疲労特性データシート	2011
113	ニッケル合金板 NW6617 (Ni-22Cr-12Co-9Mo) の長期高温低サイクル疲労特性データシート	2011
114	溶接構造用圧延鋼 SM490B 荷重非伝達すみ肉溶接継手の疲労特性データシート—板厚の効果(その4, 板厚 40mm)—	2011
115	チタン合金 Ti-6Al-4V ELI(900MPa 級)の高応力比側ギガサイクル疲労特性データシート	2011
116	水素チャージした機械構造用合金鋼 SCM440(0.4C-1Cr-0.2Mo)のギガサイクル疲労特性データシート	2012
117	球状黒鉛鋳鉄 FCD400 と FCD800 のギガサイクル疲労特性データシート	2012
118	ステンレス鋼 SUS630 (16Cr-4Ni-4Cu) の低・高サイクル疲労特性データシート	2014
119	アルミニウム合金板 A5083P-O (Al-4.5Mg-0.6Mn) のギガサイクル疲労特性データシート	2015
120	ステンレス鋼 SUS630 (16Cr-4Ni-4Cu) のギガサイクル疲労特性データシート	2016
121	アルミニウム合金板 A5083P-O (Al-4.5Mg-0.6Mn) 高応力比側ギガサイクル疲労特性データシート	2016
122	ステンレス鋼 SUS630 (16Cr-4Ni-4Cu) の高応力比側ギガサイクル疲労特性	2017
123	アルミニウム合金 A7075-T6 (Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu) の低・高サイクル疲労特性シート	2017
124	二相ステンレス鋼 SUS329J3L (22Cr-5Ni-3Mo) の低・高サイクル疲労特性データシート	2018
125	アルミニウム合金 A7075-T6 (Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu) のギガサイクル疲労特性データシート	2018
126	アルミニウム合金 A7075-T6 (Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu) の高応力比側ギガサイクル疲労特性データシート	2019

No.	名 称	発刊年
127	二相ステンレス鋼 SUS821L1 (21Cr-3Mn-2Ni-1Cu)の低・高サイクル疲労特性データシート	2020
128	アルミニウム合金 A6061-T6 (Al-1.0Mg-0.6Si)の低・高サイクル疲労特性データシート	2020
129	二相ステンレス鋼 SUS327L1 (25Cr-7Ni-4Mo)の低・高サイクル疲労特性データシート	2021

腐食データシート

No.	名 称	発刊年
0	低合金鋼 大気腐食特性データシート作成計画	2002
1C	Fe-Cr、Fe-Ni 二元系合金 大気腐食特性データシート	2010
2	Fe-Al、Fe-Si 二元系合金 大気腐食特性データシート	2005
3C	炭素鋼、耐候性鋼 大気腐食特性データシート	2014
4C	Fe-P、Fe-Cu 二元系合金 大気腐食特性データシート	2016
5	炭素鋼の短期繰返し暴露の大気腐食特性データシート	2011
6	炭素鋼 大気腐食特性データシート ―大気環境因子の影響―	2019

注 (No. に付したアルファベットの意味) :

数字のみの初版 : 約 1 年、A 版 : 約 3 年、B 版 : 約 7 年、C 版 : 10 年。

「鉄鋼の信頼性向上技術の系統化調査」

報告書冊子との相違点(正誤表)

ページ	段落	行	第 32 集 冊子版 2023 年 3 月	全文 PDF 版 2023 年 8 月 (正)
241	左	11	T-2 型油層船の一隻	T-2 型油槽船の一隻
241	右	8	午前 6 時 30 分頃	午後 6 時 30 分頃
245	左	下から 3 ～ 2	実習（理論）と座学（実践）	座学（理論）と実習（実践）
265	右	17	材料供給－製品組立－使	材料供給－製品組立－使
277	左	25	実物での結果を再現性できる	実物での結果を再現できる
277	右	14	試験機をヴェーラーが開発できていた	試験機をヴェーラーは開発できていた
287	左	下から 1	蒸気	火力
287	右	1	650 °F (=344 °C)	650 °F (=343 °C)
287	右	2	1 000 °F (=544 °C)	1 000 °F (=538 °C)
289	コラム	11	一定で進行と仮定すると	一定で進行すると仮定すると
290	右	12	抜きんでいても	抜きんでても
290	右	13	抜きんでいる性能	抜きんでた性能
291	右	5	立場で系統釣に実施する	立場で系統的に実施する
293	右	下から 6	破断データ得られる	破断データが得られる
294	左	3	数万時間データ得られる	数万時間のデータが得られる
294	右	下から 20	国内外への規格検討作業へに	国内外の規格検討作業に
296	左	下から 19	でなされるところを保証する	でなされるところを保証する
301	左	8 ～ 9	当該実験場：当該の影響	凍害実験場：凍害の影響
306	右	下から 7（タイトル）	安全・安全	安全・安心
307	左	1 ～ 2	規格等にはなんら違反していない	規格等の要求内容には違反していない
313		33A	Fe based 21Cr-20Ni-20Co-3Mo-2.5W-(Nb+Ta) -N	Fe based 21Cr-20Ni-20Co-3Mo-2.5W-(Nb+Ta) -N