

セラミックスの機械的性質

著者 佐々木 清一

江苏工业学院图书馆
藏书章



社団法人 窯業協会

セラミックスの機械的性質

昭和 54 年 5 月 1 日 初版発行 定 価 2,000 円

昭和 55 年 12 月 1 日 2 版発行

©編集者 セラミックス編集委員会講座小委員会

発行者 大 場 立 夫

印刷者 千 葉 登

印刷所 株式会社 技 報 堂 107 東京都港区赤坂 1-3-6

発行所 社団法人 窯 業 協 会 160 東京都新宿区百人町 2-22-17

電話 東京 (03) 362-5231

振替口座 東京 9-21133 番

セラミックス基礎工学講座小委員会

委員長

花澤 孝 萱場工業株式会社航空機器事業本部

委員

阿部 弘 旭硝子株式会社研究所

宇田川重和 東京工業大学工学部無機材料工学科

米屋 勝利 東京芝浦電気株式会社総合研究所

戸田 堯三 株式会社日立製作所生産技術研究所

本講座の執筆担当者と担当章

阿部 弘 旭硝子株式会社研究所 I 章, III. 3 節, VI. 10 節, 13 節, IX. 4~5 節, X 章

岩崎 秀夫 東京芝浦電気株式会社総合研究所 VI. 12 節

宇田川重和 東京工業大学工学部 I 章, VI. 13 節, X 章

上垣外修巳 株式会社豊田中央研究所 VIII 章

川合 実 旭硝子株式会社研究所 III. 3 節, IX. 4~5 節

岸井 貴 東京芝浦電気株式会社総合研究所 VI. 11 節

米屋 勝利 東京芝浦電気株式会社総合研究所 I 章, VI. 1~6 節, 13 節,
IX. 1~3 節, 6~9 節, X 章

高畠 満夫 旭硝子株式会社研究所 IX. 4~5 節

津谷 裕子 通産省工業技術院機械技術研究所 VI. 8 節

戸田 堯三 株式会社日立製作所生産技術研究所 I 章, VI. 13 節, IX. 6~9 節, X 章

中山 淳 旭硝子株式会社研究所 VI. 7 節

塗師 幸夫 岐阜大学工学部 VII 章

花澤 孝 萱場工業株式会社航空機器事業部 I 章, VI. 9 節, 13 節, X 章

浜野 健也 東京工業大学工業材料研究所 IV 章

原 守久 旭硝子株式会社船橋工場 II 章, III 章, V 章

橋本 八郎 東京芝浦電気株式会社総合研究所 VI. 1~6 節

日比野泰三 岐阜大学工学部 VII 章

“セラミックスの機械的性質” 刊行にあたって

セラミックス基礎工学講座の第1編として“機械的性質とセラミックス”がセラミックス誌に掲載されたのは昭和51年1月号であった。これは、石油危機を契機とした当時の社会的、経済的環境のもとで、窯業の技術に関係を持つ者にとって、それなりの必然性があったからである。その後、3年を経過するにつれて、窯業を取り巻く社会の変化は急激に進んだ。その結果、1次、2次の各産業に属する各製造業は、低賃金を武器とした中進国の追いあげとドル不安に基づく円高との両者の挟み撃ちを受け、まさに翻弄の波に洗われつづけさせられたといっても過言ではなかった。これに対しては、各社とも社内の合理化と人減らしによって、何とか乗り切ってきたというのが現状であろう。

しかし、このままでは、経済大国となった日本としては全く、無為、無策であって“世界の進歩に何らの貢献なし”との非難に答えることはできないであろう。更に、国内問題に限定してさえも、将来の高齢化社会を控え、顕著な技術的進歩の無いままでは、輝かしい未来を期待することは不可能に近い。そこで、上述の困難に対処するため、新規需要の創出と開拓が我々メーカーに課せられた至上命令の一つとして登場することになる。

さて、一方において、昭和48年の石油ショック以来、省資源、省エネルギーが生産と生活のあらゆる分野で要求されるようになった。その結果、機械工業を中心としたユーザーからは構造材料に対し、(i) 強くて軽いこと、(ii) 耐熱、耐食、耐摩耗性に優れていること、(iii) 寿命の長いこと、などが強く望まれるようになった。

このような背景のもとに、素材産業に従事する者にとっては、将来の材料開発の方向として、機能材料が重視されてはいるが、構造材料の重要性もいささかも衰えてはいない。特に、この数年来はセラミックスが、その特徴である硬くて軽く、耐熱性と耐食性、耐摩耗性に優れる点に注目され、これを機械部品に応用しようという動きが活発化して、一種のブームといった観さえ呈する有様である。

そこで、以上の状況を踏まえ、セラミックスの機械的性質を基礎から理解して身につけ、これを正しく応用してゆくため、セラミックス誌に連載された“機械的性質とセラミックス”の講座を一冊にまとめ、これを窯業に関係する科学者、技術者に広く提供する必要があるのではなかろうかという意見が出され、検討を重ねた末に、その方向で進むという結論に達した。

ユーザーの材料に対するニーズによって裏づけられた上述のような動向に答えるには、我々窯業に従事する者としても、科学的な方法論を身につける必要がある。単に、必要に応じてのそのつどごとの衝動的な対応策では線香花火的な一時しのぎに終り、第2次大戦後35年を経過して再び巡りきたセラミックスの機械的な用途への応用という好機を失う恐れさえある。戦後のサーメット開発に端を発し、ダクタイルセラミックスを経て、現在のサイアロンの技術へと、一貫して流れつづけてきた技術史の一端として捕えることの必要性を痛感した次第である。

戦後を起点として、過去35年間に蓄積されたセラミックスの機械的性質に関する経験と知

識は極めて膨大な量に達するであろう。一方、この間に、窯業以外の分野における進歩もまた刮目に値するものがある。したがって、両者の巧みな結合によって、従来全く予想もされなかったような新展開が期待できるのである。一例を挙げるならば、かつて手を焼いたサーメット製タービンブレードの検査と品質管理の技術も、現代の高度な AE 技術を応用するならば、比較的容易に達成できる可能性が開けるのではなかろうか。このような蓄積に加えて、金属材料の分野における強度に関する理論的進歩もまた著しいものがあつた。そこで、同様な取扱いが窯業の分野でも必須不可欠な手段に育つ絶好の機会に恵まれたと判断された。

かくして、本書では講座で取扱われた金属ベースの強度理論に全面的な手直しを加えることとなった。そのため、ここで取扱ったセラミックスの強度理論は講座に比べてより一層セラミックスに密着したものになったということができよう。本書がセラミックス基礎工学講座を母体としながらも、更に、最近の進歩を取入れ、セラミックスの強度を、従来にも増して実際に即したものとすることができたのは上述のような

理由に基づくものである。更に、機械的性質と微構造との関係、あるいは製造技術との関連性を踏まえ、特に、その試験方法については多方面から現状の技術を明らかにした。それは機械的性質の正しい評価方法の存在しない限り、その改善は容易ではないとの認識に立脚したからである。最後に、本書における最大の恨みは何といっても応用にまで深く言及できなかった点であろう。後日、機会を得て応用編として結実させたいものとする。

終りに、本書が刊行の日の目を見たのはひとえにセラミックス誌で講座を御愛読頂いた窯業関係の科学者、技術者の強い出版への要請があったからである。また、他方において、このニーズに答えて、本書出版のため全面的な御支援を頂いた編集委員会の諸委員と、最終的には、出版を快く御許可くださった会長を初めとする理事会の各担当理事に厚く感謝申しあげる次第である。なお、本書の各担当部分を分担頂き、この完成に心血を注がれ、本書の生みの親ともなれた執筆者各位と窯業協会編集事務局の清水正秀氏に心から感謝を表わし、本書刊行の辞に代えるものである。

昭和 54 年 3 月

セラミックス編集委員会講座小委員会

花澤 孝，宇田川重和，戸田 堯三，米屋 勝利，阿部 弘

講座開講にあたって

我が国の経済、社会が高度成長から安定成長へと大きな転換を余儀なくされ、その選択を模索している現在、窯業界においては、その科学と技術に従事する人達が新時代の技術的要請を的確に捉え、それに適切に対処する好機に直面しているともいえる。しかし、そのためには、われわれ窯業の科学者・技術者が、従来にもまして、広い視野から将来を見通し、各個人の置かれた特殊性を踏まえ、独創的な技術の展開が是非とも必要になってくるものと確信している。

このような転機にあって、窯業の科学者・技術者の多くは単に過去に受けた教育や職場で得られた経験に頼るだけでは不十分であり、これを新しい理論や技術によって補強し高レベルにすることの必要性を痛感されていることと思う。また、資源の少ない我が国の場合、従来のような導入技術の理解と応用だけではなく、真に独創的な自主技術の開発が、特に強く要請されているところであるが、これには材料科学的な基礎理論とそれに基づいた開発手法を身につけることが不可欠なことは今更いうまでもないことである。新しい理論や技術を真には握して、これを自由自在、独創的に応用して初めて、今後の展開が可能となり、独創的技術の開発を期待できよう。

セラミックス誌の内容については、昭和 45 年の“会員の声アンケート調査”や直接編集委員会に寄せられた会員の声などから判断して、前回の工業高校窯業科の学生を対象とした初級講座に引続き、これを一步進めて、より専門的に、更に突っ込んだ内容の講座としてセラミックス誌に掲載してほしいという意見がしばしば編集委員会に提案されていた。一方、窯業教育委員会が昭和 47 年 1 月に実施した大学の無機材料関係の諸学科に対するアンケート調査でも、セラミックス関係の教科書、参考書の不十分さに苦勞しているので、講座を再開してほしいとの強い要望が出されていた。これらの結果が端緒となり、大学の窯業関係学科の学生を含めて、広く窯業の科学と技術の第一線で活躍されている科学者、技術者の要望に答えるため、あらたに、セラミックス基礎工学講座を提供することになった。

したがって、この講座では、まず窯業に関する新しい基礎理論を平易に説明し、これを土台に応用力を養い、更に、研究や生産の現場に結びつける問題解決能力の賦与に主眼を置いた。そのため、基礎理論の説明で、通常行われる厳密な数式的表現やその導出を従に考え、むしろ、理論の奥に潜む物理的、化学的、技術的内容の理解に力を注いだ。その結果、身近な事例の引用には特に意を配ったつもりである。

本講座は上記配慮から出発したが、読者におかれては、各自の置かれた環境とニーズに基づき、更にその有効適切な活用法を創案され、その効果をあげられんことを期待するものである。

セラミックス編集委員会講座小委員会

目 次

“セラミックスの機械的性質”刊行にあたって.....	iii
講座開講にあたって	v

I. 緒 論.....	1
1. 本講座の考え方とその特徴	1
2. セラミックスの機械的性質をとりあ	げた理由..... 2
3. 本講座の内容概説	2

II. 固体の機械的性質序論.....	5
1. 応力とひずみ.....	5
1.1 固体内の応力	5
1.2 微小ひずみと弾性率	6
1.3 応力-ひずみ曲線.....	7
1.4 クリープと粘弾性	8
2. 原子間力と固体の理想強度	10
2.1 原子間力	10
2.2 固体の理論引張り強度	11
2.3 固体の理論せん断強度	12
文 献.....	12

III. セラミックスの強度理論.....	13
1. 破壊力学	13
1.1 き裂による応力集中	13
1.2 グリフィスの理論とき裂拡大力	14
1.3 線型破壊力学の基本概念	15
1.4 応力拡大係数の数値例	16
2. 転移論とセラミックス	18
2.1 パイエルス力	18
2.2 転位の移動と塑性変形	19
2.3 多結晶体の塑性変形	20
2.4 塑性変形によるき裂の発生	20
3. セラミックス強度の統計表示.....	21
3.1 強度の統計表示	21
3.2 ワイブル統計	22
3.2.1 ワイブル分布関数	22
3.2.2 寸法効果	22
3.2.3 試験法による強度の差	22
3.2.4 破壊確率の検定	23
文 献.....	23

IV. セラミックスの微構造と機械的性質	25
1. セラミックスの機械的性質の特徴と 微構造との関係	25
2. 微構造試験方法	27
2.1 X線回折法	28
2.2 偏光顕微鏡観察法	29
2.3 反射顕微鏡観察法	30
2.4 電子顕微鏡観察法, その他の試験法	31
3. ヤング率に影響を与える要因	32
4. 機械的強度と気孔率	33
5. 強度に及ぼす気孔やき裂先端の曲率 半径の影響.....	34
6. 気孔やき裂の大きさなどの影響	36
7. 粒子の大きさの影響.....	36
8. 粒子境界の影響	37
9. 内部応力による影響	38
10. ガラス相を伴うセラミックス—— 磁器素地の強度	40
11. 複合材料の強度	43
12. セラミックスの強化.....	45
む す び	46
文 献.....	46

V. ガラスの強度	49
1. はじめに	49
2. 結晶体と非晶体	49
3. ガラスの理論強度	50
4. グリフィスキ裂と実用強度	50
5. 加傷強度	51
6. 処女ガラスの強度	52
7. き裂の伸長と破壊力学	53
8. 静的疲労	55
9. むすび	56
文 献	57
VI. 機械的性質の把握とその評価方法	59
1. 機械的性質の把握	59
2. 曲げ強さ	59
2.1 試験方法とデータの整理	59
2.2 強度データの評価	61
2.3 高温強度	63
3. 引張り強さ	64
4. 圧縮強さ	65
5. 圧環強さ	65
文 献	66
6. クリープ試験	66
6.1 はじめに	66
6.2 曲げクリープ	67
6.3 引張りクリープ	68
文 献	69
7. 熱衝撃	69
7.1 熱衝撃抵抗	69
7.2 各種理論抵抗係数	70
7.2.1 破壊抵抗係数	70
7.2.2 損傷抵抗係数	70
7.2.3 クラック安定係数	71
7.3 熱衝撃試験法	71
7.3.1 急熱急冷繰返し法	72
7.3.2 急冷強度測定法	72
7.3.3 ふく射急熱法	73
むすび	74
文 献	75
8. 摩擦と摩耗——機械的性質との 関連——	75
8.1 はじめに	75
8.2 摩耗過程	75
8.3 セラミックスの摩擦と摩耗	77
8.3.1 結晶方位の影響	77
8.3.2 ふん囲気の影響	78
8.3.3 摩擦摩耗測定上の注意事項	82
8.4 セラミックス等の硬さや強さとふん囲 気の関係	82
8.5 セラミックスの摩擦と摩耗に関するふ ん囲気特性の説明	83
8.6 セラミックスの高温における摩擦係数	85
8.7 むすび	85
文 献	85
9. 摩擦と摩耗の試験方法	85
9.1 はじめに	85
9.2 摩擦と摩耗に影響を及ぼす因子	85
9.2.1 温 度	86
9.2.2 荷 重	86
9.2.3 摺動速度	86
9.2.4 接触面積とその形状	86
9.2.5 摺動距離	86
9.2.6 ふん囲気	86
9.2.7 材料物性	87
9.2.8 表面仕上げ	87
9.2.9 振 動	87
9.2.10 潤滑の形式	87
9.3 試験機の種類	87
9.3.1 基礎研究のための試験	87
9.3.2 材料のキャラクタリゼーションと 比較	87
9.3.3 潤滑剤の評価	87
9.3.4 使用条件のシミュレーション	88
9.4 摩擦と摩耗試験の実施方法	88
9.4.1 荷 重	88
9.4.2 摺動速度	88
9.4.3 摩 擦 力	88
9.4.4 ふん囲気	88
9.4.5 パルク温度	88
9.4.6 皮膜厚さ	88
9.4.7 表面温度	88
9.4.8 接触抵抗	88
9.4.9 摩 耗 量	89
9.4.10 表面の損傷	89
9.5 代表的な試験装置	89
9.6 むすび	92
文 献	92
10. 材料の破壊とフラクチャーメカニッ クス	96
10.1 グリフィスの破壊理論と応力拡大係数	96
10.2 サブクリティカルクラックグロースと	

VII. セラミックスの製造操作と強度の関係		141
1. セラミックスの強度と製造操作上の	2.1 原料製造履歴の影響	142
因子	2.2 粒度配合の影響	143
141	2.3 乾燥過程	144
2. 加熱以前の操作の影響		
142		

2.4 熱分解, 仮焼	145	3.3 焼成ふん囲気の効果	150
2.5 粉碎及び混合	145	3.4 ホットプレス法	150
2.6 造 粒	147	3.5 添加物効果	150
2.7 圧粉体 (成形方法・成形圧)	147	3.6 焼結後の処理効果	151
3. 加熱以前の操作過程の影響	147	4. む す び	151
3.1 固体反応	148	文 献	152
3.2 加熱時間, 加熱温度の影響	150		

VIII. セラミックスにおける疲労寿命の予測

1. 機械的応力下での疲労	155	2.1 静的熱疲労	159
1.1 静的疲労	155	2.2 動的熱疲労	160
1.2 動的疲労	156	2.3 T-SPT 線図	161
1.3 SPT 線図	156	文 献	162
2. 熱応力による疲労 (熱疲労)	158		

IX. セラミックスの材料設計

1. 重視されつつあるセラミックスの機 械的性質	163	4.1.4 破壊エネルギー	171
2. セラミックスが高温機械部品となる には	164	4.2 耐 熱 性	172
3. セラミックスの高温強度に影響する 要因	164	5. フラクトグラフィーと材料設計	173
3.1 高温強度に関連した構造因子	165	5.1 破面観察の方法	173
3.2 微構造と高温強度	165	5.2 破面の一般的性質	173
3.2.1 構成相と高温強度	165	5.2.1 粒界破壊と粒内破壊	173
3.2.2 気孔率と高温強度	166	5.2.2 微構造と破面	174
3.2.3 結晶粒形及び粒径と高温強度	166	5.3 破壊発生源と破面	174
3.3 ふん囲気, 形状の効果	167	5.4 破壊発生源	174
文 献	167	5.5 高温破面	175
4. セラミックスの高温性能に影響する 要因	168	文 献	177
4.1 耐熱衝撃性に影響する諸因子	168	6. 高温高強度セラミックス	177
4.1.1 熱膨張率	168	7. 高温高強度化のための必要条件	178
4.1.2 熱伝導率	170	8. 高温高強度化のための材料設計指針	178
4.1.3 ヤング率	170	8.1 窒化ケイ素	178
		8.2 窒化アルミニウム	180
		9. 高温材料としての高温高強度窒化物	180
		文 献	181

X. “セラミックスの機械的性質”を終るにあたって

文 献	184
-----------	-----

I. 論

緒

I.1 本講座の考え方とその特徴

窯業材料を工学的に眺めた場合に、その用途がまず第1に頭に浮かぶが、これを直接とりあげるよりは、まず、材料の“物性”に注目し、これが外的条件との相互作用によって種々の“現象”を呈し、最後に“用途”に結びつけられ、製品として販売されてゆくと考えるのが自然である。そこで、これらの関係を材料を中心に整理してみると図 I-1 のようになる。すなわち、物性、現象、用途の3者を三角形の頂点に置き、その中心に材料を配置するならば、上述の関係、換言すれば、材料を中心とした物性、現象、用途の間に成立する密接な関係を理解することが容易となる。

窯業材料の科学と技術に従事する人達にとって、材料をこのような立場に立って眺めるならば、このサークルを材料を中心に物性→現象→用途と回転させ、characterizationの手法を巧みに適用してゆくならば、材料は次第に改善され、より高度な性能を備えた安定した製品を創り出してゆくことが容易となろう。

さて、このような観点に立って、この講座を進めるならば、次の問題として、当然いくつかの特徴を挙げ

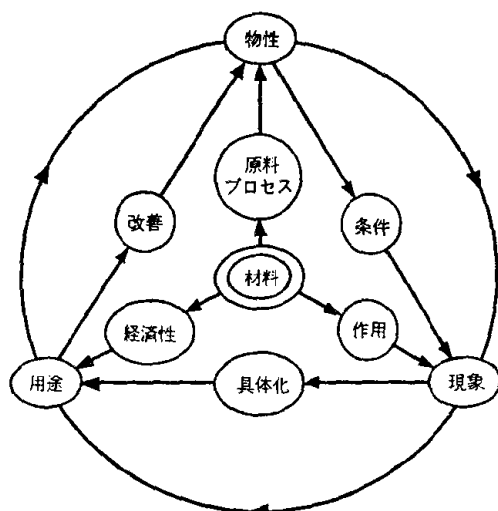


図 I-1 材料と物性・現象・用途の関係

ねばならなくなろう。

まず第1に採りあげた点は、材料の開発とその用途開発について現在までとられてきた方法に対する反省である。従来、新製品の開発に当たって多く採られてきた手法はユーザーのニーズ、換言すれば、在来品によって満たされてきた部品の機能为目标とし、これを充足させるための新材質の創出であり、新用途の開拓に重点が置かれてきた。白熱電灯から蛍光灯への変化や、トランジスターによる真空管の置換などはこれに相当する。このような例はすべて、すでに存在する材料の性能を新材質によって置換するものであって、システムを構成する一 부품の他部品への変更にすぎなかった。すなわち、下に示される“部品-部品”置換方式であった。

部品A + 部品B + → システム
↓ ↓
部品A' + 部品B' + → 新システム

しかし、今後の開発の方向は資源の有限性を考慮し、従来の複数の部品によって充足されていた機能を新しい単一部品によって置換することも考えに入れ、省資源、省エネルギー、高信頼性といった特色を生かすことも必要となろう。下の新部品Xによる複数部品の置換方式がこれに相当しよう。

部品A + 部品B + → システム
↓
新部品X + → 新システム

このような方法は現象を基礎的に理解し、物性から材料へと逆の道をたどることによって初めて達成可能となるものである。

次に、本講座の特徴の第2は、材料の設計を取りあげた点にある。昭和43年に出版された岩波書店刊「基礎工学講座」の“基礎工学概説”の中で向坊東大教授が、この問題を提起されて以来10年近くになるが、窯業において新材質が創出される実際の場で、残念ながら、まだこのような手法が定着し、実効をあげるまでには至っていない。この講座では、第一線で活

躍している技術者が日々の苦勞を通して体験した経験をもとに、この問題に挑戦し、窯業における材料設計の重要性を実例を通して眺め、窯業の将来への発展の一つの手がかりを提供したい。

材料を用途という点から考えてゆくならば、この講座の第3の特徴として、材料性能の評価という問題を無視するわけにはゆかない。窯業のように比較的規模の小さい工業分野では、材料の実用的な性能の評価を、メーカー自身ですることなくユーザーに委ねることが少なくなかった。特に材料の耐久性を含めた実際的な性能評価の場合に、このような事例に遭遇することが比較的多かった。その理由は明白である。すなわち、実用の場で材料の関与する現象が複雑で、そのため、実用試験か又はこれに準ずる大規模なベンチ試験で総合的な材料の性能を評価する以外に信頼性の高い評価方法が見当たらなかったためである。しかし、このような状況は、材料メーカーとそのユーザーの間に不信感を醸成し易い。ユーザーに対しては特に、材料の特性を根本から理解し、その材料に適した使用方法や設計をとりあげ、目標とする機能を備えた新製品開発の積極的努力を怠らせ、あり合わせの材料で間に合わせようとする安易な傾向を助長させ易かった。今後の方向としては、冒頭にも述べたように、characterizationの徹底をはかり、同時に、材料の直面する現象の内容を深く掘り下げ、比較的簡単な試験方法のいくつかの結果をもとに、複雑な現象に対応できる材料の物性とその特性を提示するに止め、以後の設計はユーザー自身の努力によって解決する態勢を築くという方法を提唱したい。

以上、極めて素朴な表現に終始したが、窯業材料をユーザーに提供する場合に、目先のユーザーへの迎合ではなく、真に有用な材料を自信を持って推奨できるばかりでなく、研究や生産の場においても、独創的に問題を解決する能力を備えた窯業の科学者、技術者を育てる端緒となることを期待し、本講座の基本的な考え方と若干の特徴に言及した。

1.2 セラミックスの機械的性質をとりあげた理由

この講座で、特に、“セラミックスの機械的性質”という標題で窯業製品の機械的性質を第1に取りあげた深い理由はなかった。強いていえば、ただ、われわれワーキング・グループの比較的多くのものが民間企業に属し、種々の異なった分野ではあるが、いずれも

新製品の開発に苦勞し、あるいはこれを製品として生産販売してゆくうえで、窯業製品の機械的強度が陰に陽にその前提条件となっていて、その基礎の上に各種の特性を苛酷に要求されることが多かったという共通の認識が存在していたということである。

しかし、このような観点に立って討論を重ねてゆくにつれて、“材料強度理論”の最近の著しい進歩が、窯業以外の分野で多くの具体的実績に結びつき成果をあげている、という事実（特に金属の分野）と対照的に、窯業においては近代的な材料強度理論の成果が比較的乏しいということ、換言すれば、窯業への前記理論の応用が漸く緒についたばかりであるという事実であった。しかも、前記理論は機械工学の分野で発達したもので、窯業分野の研究者、技術者にとって難解であって、このままでは、これを応用して実際面で成果をあげるにはまだまだ時間がかかりそうだという悲観的な結論にならざるを得なかった。

一方、数年前から、窯業材料の科学と技術を将来に向かって展開してゆくために、characterizationという新しい概念が導入され、原料や製造方法の違い、あるいは製品の微細構造の特徴の徹底的な理解が、新しい物性、新しい材料の創製に不可欠であることが周知徹底されるようになってきていた。このような趨勢のもとで窯業材料の強度を理解し、その向上をはかり、同時に品質の安定を達成させるため、characterizationの応用の場として、窯業材料の強度をとりあげるのは時宜を得た計画であると確信するようになってきた。

そこで、現在の情勢をも踏まえ、特に独創性の必要な将来に対処する出発点として、敢えて機械的性質をとりあげることにした。

1.3 本講座の内容概説

セラミックスは、無機材料における多種多様の物質を包含しているため、実用材料の強度に関する個々のケースを本講座でカバーすることは極めて困難であるが、各章に盛られた内容は、セラミックス特有の性質を材料強度の面から浮き彫りにしたものであり、すべてのセラミックスの強度問題につながる基本的なものといえる。

図 I-2 は、セラミックスの強度という柱を中心に、材料の構成要素から応用分野に至るまでの相互のつながりを一つにまとめた“強度樹木”である。現実には、セラミックスの強度を考える時、われわれはそれを取りまく種々の因子をどのように整理し、それを得られ

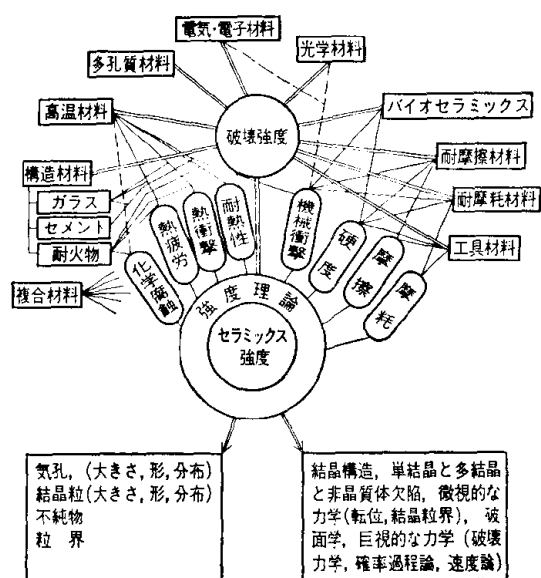


図 1-2 強度樹木図

た結果と如何に結びつけるかに苦心する。

例えば、セラミックスの強度を支配する因子は何か、微構造との定量的関係はどうか、データのバラツキの原因はどこから来るのであろうか、あるいはセラミックスの破壊はどのような状態の時に起こり、破壊の道筋はどうであろうか、セラミックスの toughness とはどういうことだろうかなど、われわれが日頃遭遇する強度に関する問題は極めて多い。また、セラミックスを使う立場の者からすれば、セラミックスの信頼性とはどういうことであろうか、その信頼性を上げるにはどうすれば良いであろうか、さらにどれ位の強度があれば、どこに使えるのだろうかという問題もある。これらの種々の問題は、取扱っている材料固有のものもあれば、またセラミックス全般に共通したものもある。したがって図 1-2 に示した“強度樹木”は、上に述べた事柄を有機的に結びつけ、現在直面している現象が、その背後にある影響因子とどのようなつながり方をしているかを表わしている。すなわち、セラミックスの強度と破壊強度を幹に、これらの裏付けとなる理論的説明を樹皮とし、さらに強度を支配するマクロ的因子とミクロ的因子を根に、種々の強度特性を枝として各応用分野へと広がって行く様子を示している。

例えば、高温材料としては、高温において所望の破壊強度を持つことが必須条件であり、そのためには耐熱性、熱衝撃、熱疲労、化学腐食、機械的衝撃などの諸特性をは握評価しなければならない。一方、これらの諸性質がセラミックスにおいてどのような強度理論で定量化できるであろうか。また結晶構造のように材料固有のものや、気孔、結晶粒界のように材料を作る

プロセスに依存するもの、あるいは破壊力学や確率過程論などと強度理論とのつながりを理解することにより、より良い材料を設計するためには、材料を構成する個々の原子から、その材料に期待される強度特性に至るまでの有機的な関連性をは握することが如何に大切であるかを知ることができる。

したがって、本講座における機械的性質の評価方法（第 VI 章）では、この章一つとりあげてもほとんど独立しており、セラミックス全般の測定法を学ぶことができるが、単なる測定技術に止まらず、測定値の再現性や精度に影響する材料製法、形状、ふん囲気などを理解することにより、一層現象の本質をつかむのに役立つものとなろう。

また、良く知られているように、セラミックスの組成、測定条件などが全く同じであっても結晶粒の大きさによって強度特性が異なることがある。このことは、セラミックスの微構造が製法と密接な関係を持ち **製法** → **微細構造** → **強度** という結びつきを示す一つの好例といえる。逆に表現すれば、まずニーズとなる応用分野があり、そこに要求される材料の強度特性が示され、強度を評価する手法、さらに破壊はどのようにして起こるかということから推定される望ましい微細構造、その微細構造を支配する各種影響因子と、これを制御するための製造プロセスという一連のつながりとして対象を検討することになる。

本講座の内容は、セラミックス（ぜい性材料）の構造に関連した強度理論と実用材料との関係（第 II、III 章）、機械的性質の測定・評価法と機械的性質に影響を及ぼすセラミックス製造の問題（第 IV、V、VI、VII 章）、以上の各章を有機的に結合した疲労寿命の予測と材料設計の問題（第 VIII、IX 章）、最後に機械的性質という点から見たセラミックスの応用分野（第 IX 章）に大別できる。これらの各章は、互に関連をもっており、相互に関係する問題を理解しながら、いくつかの章にまとめて読まれるのが理想的である。

また、本講座の特徴の一つであるが、強度及び破壊の研究手法あるいは機械的性質測定上のポイントなど、実際の測定にあたって起こる種々の問題点理解の手引きとなる項目を設けてあり、その活用はデータの定量化にきわめて有効であると考ええる。

以上、セラミックスの強度に関する講座を始めるに当たり、その主な内容と特徴を述べたが、材料科学の広い視野に立ってセラミックスにおける強度問題を把握するのに本講座の活用を図られることを期待するものである。

II.

固体の機械的性質序論

II.1 応力とひずみ

セラミックスの機械的性質を論ずるために必要な基礎知識として、固体内部の応力^{*1}とひずみ^{*2}及び両者の関係について述べることにする。詳しいことは弾性論¹⁾、塑性論²⁾あるいはレオロジー³⁾の教科書を参考にしていきたい。

1.1 固体内の応力

外力を受けている固体内部の任意の点を含む小平面を考えると、これに境された両側の物質は互いに力を及ぼしあっている。面の向きをその法線方向の単位ベクトル n で示すとき、 n の正の部分が負の部分に働きかける単位面積当りの力 F を応力と定義する（図 II-1）。負の部分は正の部分に対し $-F$ の力を及ぼしていることになる。固体内の応力は必ずしも作用面に垂直ではない。面に垂直な成分を垂直応力^{*3}、面に平行な成分をせん断応力^{*4}といい、それぞれを σ 及び τ で示そう。定義により、垂直応力が正の場合は張力、負の場合は圧力となる。張力は物体を引き伸ばし分割する方向に作用し、せん断応力は面間のすべりをひき起こし、物体に非可逆的な変形を与える働きをする。

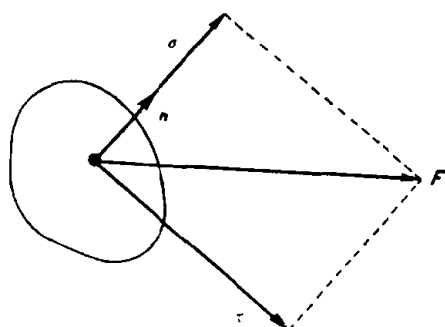


図 II-1 固体内部の応力

*1 応力 (stress)

*2 ひずみ (strain)

*3 垂直応力 (normal stress)

*4 せん断応力 (shear stress). 近年物理学関係では“ずり応力”を使うことが多い。

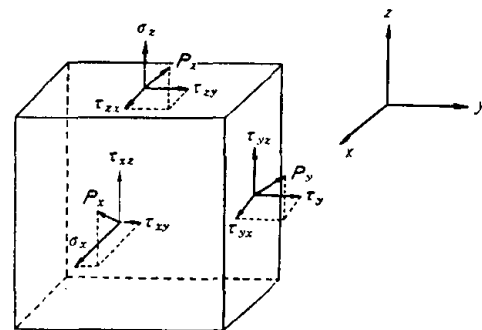


図 II-2 応力テンソルの成分

応力の単位は国際単位系^{*5}では N/m^2 であるが、 kg/mm^2 , lb/in^2 が広く用いられている。

$$10^9 N/m^2 = 101.97 kg/mm^2 = 1450.4 lb/in^2$$

である。

平面の向き n を変えると F も変わる。いま直交座標系における三つの座標面に働く応力の各成分を図 II-2 のように書くと、 F の成分 f_x, f_y, f_z は、 n の成分（方向余弦） l, m, n の関数として、次式のように表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} f_x &= \sigma_x l + \tau_{yx} m + \tau_{zx} n \\ f_y &= \tau_{xy} l + \sigma_y m + \tau_{zy} n \\ f_z &= \tau_{xz} l + \tau_{yz} m + \sigma_z n \end{aligned} \right\} \quad (II-1)$$

力のモーメントのつり合から $\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{xz} = \tau_{zx}$, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ になるから、物体内のある点近傍の応力の状態は σ_x, τ_{xy} など 6 個の成分を持つ対称テンソルで代表されることになる。適当な方向を選ぶと、 F と n の方向が一致し、せん断応力が 0 となり、垂直応力が極値を取るようになる。この方向を主応力軸^{*6}といい、このときの垂直応

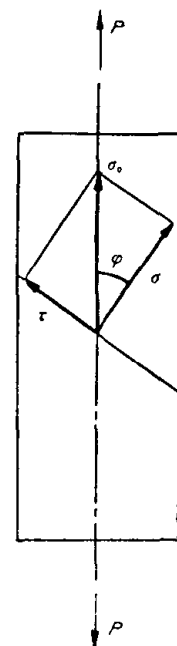


図 II-3 1 軸荷重を受ける棒の応力

*5 国際単位系 (International System of Units, 略称 SI)

*6 主応力軸 (principal axis of stress)

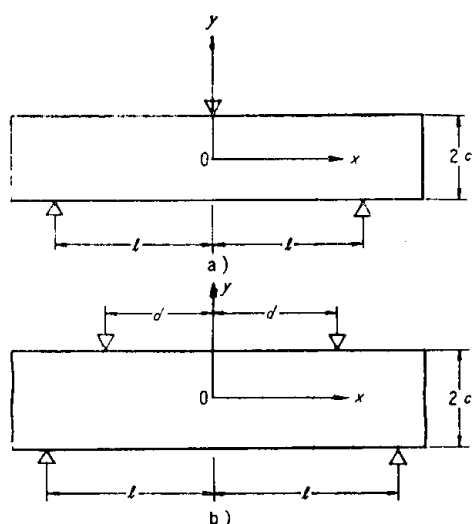


図 II-4 曲げ試験. a) 3点曲げ, b) 4点曲げ

力を主応力^{*1}という. 主応力軸は3個あり, 互に直交している.

特別な場合として, 図 II-3 のように, 一様な断面積 A を持つ棒の軸方向に荷重 P を加えるときの応力の状態を調べてみよう. 軸線と角 φ だけ傾いた断面の面積は $A/\cos \varphi$ であるから, この断面に作用する軸方向の応力 F は

$$F = P \cos \varphi / A,$$

面に垂直な応力成分 σ は, $P/A = \sigma_0$ と置くと,

$$\sigma = \sigma_0 \cos^2 \varphi = \frac{1}{2} \sigma_0 (1 + \cos 2\varphi) \quad (\text{II-2})$$

面に平行なせん断応力は,

$$\tau = \sigma_0 \cos \varphi \cdot \sin \varphi = \frac{1}{2} \sigma_0 \sin 2\varphi \quad (\text{II-3})$$

となる. したがって, 最大垂直応力 $\sigma = \sigma_0$ は $\varphi = 0$, すなわち軸に垂直な面に働き, 最大せん断応力は $\sin 2\varphi = 1$, すなわち軸線に対し 45° 傾いた面に作用する. 最大せん断応力の大きさは, σ_0 が張力の場合も圧力の場合も $\sigma_0/2$ である.

曲げ試験における試験片中の応力は, ナイフエッジの近傍を除くと, 弾性論でよく知られたはりの曲げの問題の結果⁴⁾ から導くことができる. 3点曲げの場合には, 図 II-4 のように座標系をとるとき, 点 (x, y) における応力成分 σ_x, τ_{xy} は

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= -\frac{3P}{4ac^3} (l - |x|) y \\ \tau_{xy} &= -\frac{3P}{8ac} \left(1 - \frac{y^2}{c^2}\right) \quad x > 0 \\ &= \frac{3P}{8ac} \left(1 - \frac{y^2}{c^2}\right) \quad x < 0 \end{aligned} \right\} \quad (\text{II-4})$$

で与えられる. ここで

P : 中心のナイフエッジにかけた荷重

a : 試験片の幅

c : 試験片の厚さの $1/2$

l : 中心から両端のナイフエッジまでの距離

である. 試験片の上面 ($y=c$) と下面 ($y=-c$) では $\tau_{xy}=0$ となり, x 軸方向に圧縮応力, 引張応力が働く. その応力の大きさは中心で最大となり, 両端のナイフエッジに近づくにつれて直線的に0まで減小する. 中立面 $y=0$ においては $\sigma_x=0, \tau_{xy}=\pm 3W/8ac$ となり, 純粹のせん断応力が働く. 主応力方向は上下面では座標軸の方向であるが, 中立面に近づくにつれて次第に傾き, 中立面では座標軸に対し 45° の方向になる. 4点曲げの場合には, 図 II-4 に示すように, 中央から上部ナイフエッジまでの距離を d とすると, 上部ナイフエッジ間では,

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= -\frac{3P}{4ac^3} (l-d)y \\ \tau_{xy} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (\text{II-5})$$

となり, x によらない一定値を示す. ここでは主応力の方向は表面も内部も座標軸の方向になっている.

1.2 微小ひずみと弾性率

応力が加えられている物体は形状, 容積あるいはその双方の変化——ひずみ——を生じているが, 応力が余り大きくない範囲では, これを取り除くと, ひずみは完全に消失する. この範囲内の変形を弾性変形^{*2}という. 長い鎖状の分子から成る有機高分子物質の中には, 弾性域におけるひずみ量が大きく, 応力とひずみの関係が非直線的なものもあるが, セラミックスや金属では, 断性限界内でのひずみは通常 $1/2\%$ 以下と小さく, 応力と良く比例しており, フック弾性体と見なされる.

物体内の点 (x, y, z) の x, y, z 方向の変位を u, v, w とする. 変位が一様ならば, 物体は剛体として移動するだけであるから, 物体のひずみは変位のこう配によって定まる. とくにひずみが小さいときは, $\partial u/\partial x$ 等の9個の成分によって, ひずみの状態を完全に表わすことができる. 更に, この中から単純な回転を除くと, 6個の独立な成分が残る. それらは,

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \\ \tau_{xy} &= \tau_{yx} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \\ \tau_{zx} &= \tau_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II-6})$$

で, これがひずみテンソルの成分である. 最初の3個

*1 主応力 (principal stress)

*2 弾性変形 (elastic deformation)