

情報センターだより

数値データ利用手引 (Numerical Data Utilization Manual)-(2)

数値データ集の分類 (1.1...1.2...は分類コード)

- 1 基礎データ
 - 1.1 基礎的物性値
 - 1.2 熱学的諸値
 - 1.3 機器分析用諸値
- 2 応用データ
 - 2.1 規格
 - 2.2 規格に準ずる規定データ
 - 2.3 デザインマニュアルデータ

(II) Handbook on Materials for Superconducting Machinery (分類 2.3)

(超電導機械装置用材料のハンドブック)

MCIC (Metals and Ceramics Information Center)

Battelle (米国) 編 1974 年版

1975 年 (1st) 及び 1977 年 (2nd) 追録付

1. イントロダクション

超電導機械装置の製作に必須の材料についての広範囲な技術情報を収録している。これらの材料のメーカーやユーザー、超電導機器装置の製作にあたることを始め、液体ヘリウム、液体酸素、液体窒素、LNG などの低温機器装置の設計製作に当たっているメーカーにとつても実用価値が極めて大きい。

このハンドブックは米国国防省の Advanced Research Project Agency (高等研究開発局) がスポンサーとなつて、バットル研究所 (Battelle Columbus Laboratories) の MCIC が NBS の Cryogenics (低温工学) Division の協力を得て編集したものである。

内容は超電導機械装置用のいくつかの構造材料および超電導材料について、その機械的、熱的、電気的、および磁気的特性を収録している。低温下、すなわち、0K (実際的には 4K) から 300K の温度範囲で使用される機械装置の設計に対して必要な情報として最も妥当と思われるデータを、数多く集積されたデータ中から選び、整理して提供している。

超電導機器に関する技術開発は急速に進歩している。米国では既に超電導システムによる艦船の推進および制御が強力に研究されてきているが、超電導発電機、モーター、電力送電、磁気浮止形走行車、その他の電気装置などを含むこれらの技術は、従来と同程度の大きさのスペースの中に従来の数十倍ものエネルギーを許容するという高効率を目的としている。それ故に、これらの機械装置の設計には新しい設計概念とこれに伴う低温材料の選択は不可欠なものなのである。

このハンドブックに収録された構造材料は、アルミニウムおよびアルミニウム合金、銅および銅合金、ニッケル合金、9Ni 鋼などの合金鋼、ステンレス鋼、チタンおよびチタン合金、特殊材料 (ニオブおよびニオブ合金等)、複合材料、ポリマー等であり、これらの引張強度、耐力、伸び、断面収縮率、ヤング率、繰返し疲労、熱

伝導率、熱膨脹係数、比熱、電気特性、磁気特性、その他の特性が入っている。これらは純度、熱処理などによる特性変化も含まれている。

この領域の技術は日進月歩であるため、このハンドブックは Supplement (追録) としてその後の新しいデータ、新しい材料が自動的に送られてくるようなシステムになつてきている。

なお、低温工学に関連するハンドブックの類としては、最近刊行された NBS の LNG Handbook があるが、これはこの利用手引の(1)でデータ集の(I)として案内しており、今回ここに案内する超電導のハンドブックと併せて、現存する低温工学に関連する諸材料の諸性質をほぼ網らしたことになると見てよい。

次に、このハンドブックの目次を掲載しておく。

CONTENTS

Section	
1.0	Introduction
2.0	Explanation of Data Collection and Presentation
2.1	Mechanical Properties
2.2	Thermal Properties
2.3	Electrical Properties
2.4	Magnetic Properties
3.0	Selected Materials for Data Collection
4.0	Aluminum and Aluminum Alloys
4.1.0	Unalloyed Aluminum
4.1.1	99.99 Aluminum
4.1.4	1100 Aluminum
4.2.0	2000 Series Aluminum Alloys
4.2.1	2014 Aluminum Alloy
4.2.2	2219 Aluminum Alloy
4.2.3	2024 Aluminum Alloy
4.3.0	5000 Series Aluminum Alloys
4.3.1	5083 Aluminum Alloy
4.3.2	5456-0 Aluminum Alloy
4.4.0	6000 Series Aluminum Alloys
4.4.1	6061 Aluminum Alloy
4.5.0	7000 Series Aluminum Alloys
4.5.1	7039 Aluminum Alloy
4.5.2	7005 Aluminum Alloy
4.5.3	7006 Aluminum Alloy
5.0	Copper and Copper Alloys
5.1.0	99.9+ Coppers
5.1.1	99.96 Copper
5.1.2	Electrolytic Tough Pitch Copper
5.1.3	OFHC Copper
5.1.4	Phosphorized Copper
5.2.0	Copper-Zinc Alloys
5.2.1	80 Copper-20 Zinc Alloy

- 5.2.2 70 Copper-30 Zinc Alloy
 - 5.2.4 90 Copper-10 Zinc Alloy
 - 5.3.0 Copper-Nickel Alloys
 - 5.3.1 90 Copper-10 Nickel Alloy
 - 5.3.2 80 Copper-20 Nickel Alloy
 - 5.3.3 70 Copper-30 Nickel Alloy
 - 5.4.0 Copper-Beryllium Alloys
 - 5.4.1 Copper-Beryllium (1.6-1.8 Be) Alloy
 - 5.4.2 Copper-Beryllium (1.8-2.0 Be) Alloy
 - 5.5.0 Copper-Tin Alloys
 - 5.5.1 95 Copper-5 Tin Alloy
 - 5.5.2 92 Copper-8 Tin Alloy
 - 5.5.3 90 Copper-10 Tin Alloy
 - 5.6.0 Copper-Zirconium Alloys
 - 5.6.1 Copper-0.2 Zirconium (Am Zirc) Alloy
 - 5.7.0 Copper-Chromium-Cadmium Alloys
 - 5.7.1 Copper-0.4 Chromium-0.4 Cadmium Alloy (PD-135)
 - 5.9.1 Copper-Aluminum Alloys
 - 6.0 Nickel Alloys
 - 6.1.0 Nickel-Copper Alloys
 - 6.1.1 K-Monel (K-500)
 - 6.2.0 Nickel-Chromium-Iron Alloys
 - 6.2.1 Inconel 600
 - 6.2.2 Inconel X-750
 - 6.2.3 Inconel 718
 - 6.2.4 Inconel 706
 - 6.3.0 Controlled Expansion Alloys
 - 6.3.1 Invar 36
 - 6.3.2 Ni-Span C
 - 6.3.3 Unnamed INCO LEA Alloy
 - 6.4.0 Pure Nickel
 - 6.4.1 High-Purity Nickel
 - 6.4.2 "A" Nickel
 - 7.0 Alloy Steels
 - 7.1.0 Nickel Steels
 - 7.1.1 9 Nickel Steel
 - 7.1.2 18 Nickel (200) Maraging Steel
 - 7.3.0 Carbon Steels
 - 7.3.1 1010 Steel
 - 7.4.0 Other Ferrous Materials
 - 7.4.1 Armco Iron
 - 7.4.3 5 Nickel Steel
 - 7.4.4 Iron (47-50) Nickel Alloy
 - 8.0 Stainless Steels
 - 8.1.0 300 Series Stainless Steel
 - 8.1.1 Type 301 Stainless Steel
 - 8.1.2 Type 304 Stainless Steel
 - 8.1.3 Type 304L Stainless Steel
 - 8.1.4 Type 310 Stainless Steel
 - 8.1.5 Type 316 Stainless Steel
 - 8.1.6 Type 321 Stainless Steel
 - 8.1.7 Type 303 Stainless Steel
 - 8.1.8 Type 310S Stainless Steel
 - 8.1.9 Type 347 Stainless Steel
 - 8.1.10 Type 410 Stainless Steel
 - 8.1.11 Type 416 Stainless Steel
 - 8.2.0 Other Stainless Steels
 - 8.2.1 Type A-286 Stainless Steel
 - 8.2.2 Kromarc-58 Stainless Steel
 - 8.2.3 Armco 21-6-9
 - 8.2.4 Armco 22-13-5
 - 9.0 Titanium and Titanium Alloys
 - 9.1.0 Unalloyed Titanium
 - 9.1.1 Titanium-65A
 - 9.1.2 Titanium-75A
 - 9.2.0 Alpha Titanium Alloys
 - 9.2.1 Ti-5Al-2.5Sn Alloy (Normal Interstitial Content)
 - 9.2.2 Ti-5Al-2.5Sn (ELI) Alloy
 - 9.3.0 Alpha-Beta Titanium Alloys
 - 9.3.1 Ti-6Al-4V (ELI) Alloy
 - 9.3.2 Ti-6Al-4V Alloy (Normal Interstitial Content)
 - 10.0 Special Metals and Alloys
 - 10.1.0 Niobium and Niobium Alloys
 - 10.1.1 Niobium
 - 10.1.2 Nb₃Sn
 - 10.1.3 Niobium-Zirconium Alloy
 - 10.1.4 Niobium-Titanium Alloy
 - 10.2.1 V₃Ga
 - 10.3.1 Magnesium Alloys
 - 11.0 Composites
 - 11.1.1 Glass-Epoxy (181/Epon 828CL)
 - 11.1.2 Glass-Epoxy (1581/E-787 [58-68R])
 - 11.1.3 Glass-Epoxy (S-901/NASA Resin 2)
 - 11.2.1 Boron-Epoxy (4.0 mil Boron/2387)
 - 11.2.2 Boron-Epoxy (5.6 mil Boron/2387)
 - 11.3.1 Graphite-Epoxy (AS/NASA Resin 2)
 - 11.3.2 Graphite-Epoxy (HT-S/X-904)
 - 11.4.1 Boron-Aluminum (5.6 mil Boron/6061)
 - 12.0 Polymers
 - 12.1.0 Ethylene-Base Polymers
 - 12.1.1 Polyethylene (PE)
 - 12.1.2 Polychlorotrifluoroethylene (PCTFE)
 - 12.1.3 Polytetrafluoroethylene (PTFE)
 - 12.2.1 Polymethylmethacrylate (PMM)
 - 12.3.1 Polystyrene (PS)
 - 12.4.1 Polyvinylacetate
- References & Bibliography
Appendix Comparison of Materials
- ## 2. データの収集と整理
- このハンドブックにあるデータは、MCIC のファイルにあるものを編集したもので、これらは MCIC 自身のデータベースによるものと、NBS の CDC (Cryogenic Data Center) からのものとがある。これらの出所文献は 900 を超え、巻末に近いところに挿入されている Reference Section で知ることができ、この Original により、より詳細を知ることが可能である。
- これらのデータベースから収録した材料の諸性質は 0 ~ 300K の温度範囲の次の部類に属するものである。

Table 2.1

Table 2.2

Alloy Designation:
 Specification:
 Form:
 Thickness, cm (in.):
 Condition:

Testing Temperature, K (F)	297 (75)		
Tension, Longitudinal			
TUS, MN/m² (ksi)(a)	Avg		
	Min		
Std. Deviation			
TYS, MN/m² (ksi)	Avg		
	Min		
Std. Deviation			
Elong, percent	Avg		
	Min		
RA, percent	Avg		
	Min		
No. of Spec. (No. of Heats)			
E, GN/m² (10⁶ psi)	Avg		
	Min		
No. of Spec. (No. of Heats)			
Poisson's Ratio			
Work Hardening Coef			
NTS, MN/m² (ksi)	Avg		
K_t =	Min		
No. of Spec. (No. of Heats)			
NTS, MN/m² (ksi)	Avg		
K_t =	Min		
No. of Spec. (No. of Heats)			
Tension, Transverse			
TUS, MN/m² (ksi)	Avg		
	Min		
Std. Deviation			
TYS, MN/m² (ksi)	Avg		
	Min		
Std. Deviation			
Elong, percent	Avg		
	Min		
RA, percent	Avg		
	Min		
No. of Spec. (No. of Heats)			
E, GN/m² (10⁶ psi)	Avg		
	Min		
No. of Spec. (No. of Heats)			
Poisson's Ratio			
Work Hardening Coef			
NTS, MN/m² (ksi)	Avg		
K_t =	Min		
No. of Spec. (No. of Heats)			
NTS, MN/m² (ksi)	Avg		
K_t =	Min		
No. of Spec. (No. of Heats)			

References:

(a) Ksi x 6.895 = MN/m²

- (a) Mechanical properties (Includes weld properties)
- (b) Thermal properties
 - Thermal conductivity*
 - Thermal expansion
 - Specific Heat
- (c) Electrical resistivity

Alloy Designation:
 Specification:
 Form:
 Thickness, cm (in.):
 Condition:

Testing Temperature, K (F)	297 (75)		
Compression, Longitudinal			
CYS, MN/m² (ksi)	Avg		
	Min		
No. of Spec. (No. of Heats)			
Ec, GN/m² (10⁶ psi)	Avg		
	Min		
No. of Spec. (No. of Heats)			
Compression, Transverse			
CYS, MN/m² (ksi)	Avg		
	Min		
No. of Spec. (No. of Heats)			
Ec, GN/m² (10⁶ psi)	Avg		
	Min		
No. of Spec. (No. of Heats)			
Shear			
SUS, MN/m² (ksi)	Avg		
	Min		
No. of Spec. (No. of Heats)			
G, GN/m² (10⁶ psi)	Avg		
	Min		
No. of Spec. (No. of Heats)			
Impact, Charpy V			
Long., J(ft-lb) (a)	Avg		
	Min		
No. of Spec. (No. of Heats)			
Trans., J(ft-lb)	Avg		
	Min		
No. of Spec. (No. of Heats)			
Fracture Toughness			
K_{Ic} MN/m^{3/2}(ksi√in.) (b)	Avg		
	Min		
Orientation: -			
No. of Spec. (No. of Heats)			
K_{Ic} MN/m^{3/2}(ksi√in.)	Avg		
(From PTSC spec.) (-)	Min		
No. of Spec. (No. of Heats)			

References:

- (a) Ft-lb x 1.356 = Joules.
- (b) Ksi √in. x 1.093 = MN^{3/2}.

- (d) Magneto-resistance
- (e) Magnetic properties.

2.1 機械的性質

このハンドブックに収録したデータは、設計者に効率的に利用できるような形式で“最善”の値を示してあり、これらの値は、文献から単に転載したものではなくて、解析と判定を加え、更に要すれば追加実験も行い最善の値を決定したものもある。この“best-value”には場合によっては8ヶ以上の繰返し実験値のばらつきを標準偏差で付記したものもある。通常の生産材を代表しない、例えば、不純物や結晶粒度が異常な材料のデータは編集に際して含めなかつたし、さらに熱処理、形状あるいは寸法に分らない材料の場合なども抜かしてある。

金属、合金、(およびポリマー)のための機械的性質のパラメーターに対する最善の値を編集した典型的な体裁を Table 2.1, 2.2, および 2.3 に示す。溶接データ

Table 2.3

Alloy Designation:	
Specification:	
Form:	
Thickness, cm (in.):	
Condition:	
Testing Temperature, K (F)	297 (75)
Fatigue, Axial Loading	
S _N at 10 ⁵ cycles, MN/m ² (ksi) Loading frequency Hz with R = and K _t = No. of S-N Curves (No. of Heats)	
Ratio S _N /TUS at 10 ⁵ cycles	
S _N at 10 ⁶ cycles, MN/m ² (ksi) Loading frequency Hz with R = and K _t = No. of S-N Curves (No. of Heats)	
Ratio S _N /TUS at 10 ⁶ cycles	
S _N at 10 ⁷ cycles, MN/m ² (ksi) Loading frequency Hz with R = and K _t = No. of S-N Curves (No. of Heats)	
Ratio S _N /TUS at 10 ⁷ cycles	
Fatigue, Flexural Loading	
S _N at 10 ⁵ cycles, MN/m ² (ksi) Loading frequency Hz with R = and K _t = No. of S-N Curves (No. of Heats)	
Ratio S _N /TUS at 10 ⁵ cycles	
S _N at 10 ⁶ cycles, MN/m ² (ksi) Loading frequency Hz with R = and K _t = No. of S-N Curves (No. of Heats)	
Ratio S _N /TUS at 10 ⁶ cycles	
S _N at 10 ⁷ cycles, MN/m ² (ksi) Loading frequency Hz with R = and K _t = No. of S-N Curves (No. of Heats)	
Ratio S _N /TUS at 10 ⁷ cycles	
References:	

にも、これが利用できるときには同じ体裁が用いられている。低温工学的温度での利用できる機械的性質のデータの大部分は引張試験データに限られるが、これは Table 2.1 に示すように編集されており、データの温度は表示の 297K (常温) から低温に向つて、表の右側のこの例示では空白になつている欄に記されており、その温度の引張試験データがそのカラムに記されている。例えば Type 301 のステンレス鋼では 297K の他に、195K, 77K, 20K の温度のデータが示されている。また、例えば、この鋼の場合には試料の条件が表中の condition の欄に記載してあり、この場合には圧下率などの異なる 3 種類の condition について 3 枚の表がついている。また、どの材料についても、圧縮、せん断、衝撃、破壊じん性、および/あるいは疲れのデータが利用できるときには、これらに対して Table 2.2 および/あるいは 2.3 のスタイルが最善の値のデータを記載するのに用いられている。

複合材料のデータに対しては、類似の体裁の表も、異なつた体裁の表も用いられているが、これについては、

ここでは記述を省略する。

大ていの場合、性質のデータは、77K あるいはそれ以下での試験データが報告された時のみ、もとの編集の表に付け加えられる。この場合には 0 から 300K の範囲のすべてのデータが付け加えられる。

表の標題は、Section 3 に示したリストによる合金の種類、溶接方法、ポリマーまたは複合材料の称号を示している。もし、specification が材料を特定できる場合にはその specification が標題に入れられている。金属や合金および溶接物に対しては、材料の厚さまたは直径も標題に入れられている。これは寸法が性質に重要な影響を与えるからである。寸法の範囲は次のように分類してある。

Sheet, Plate, and Flat Forgings and Extrusions (Thickness):

- Up to 0.099 cm (0.039 in.)
- 0.100 to 0.319 cm (0.040 to 0.125 in.)
- 0.320 to 0.634 cm (0.126 to 0.249 in.)
- 0.635 to 1.269 cm (0.250 to 0.499 in.)
- 1.270 to 2.540 cm (0.500 to 1.000 in.)
- 2.541 to 5.080 cm (1.001 to 2.000 in.)
- Over 5.080 cm (2.000 in.)

Bar Stock, Forged Stock, and Non-Flat Extrusions (Diameter or Thickness):

- Up to 2.540 cm (1.000 in.)
- 2.541 to 5.080 cm (1.001 to 2.000 in.)
- Over 5.080 cm (2.000 in.)

同じ合金種で同じ厚さの範囲でいくつかの異なつた熱処理および/あるいは圧延での加工条件についてのデータが利用できるときには、低温用に用いられると考えられるならば、これらの条件でのデータが示されている。

機械的性質の表の最初のカラムにはパラメータと単位が示されている。太字はパラメータと最善の値 ("Avg" として示されている) とに対して用い、他の数値より目立つようにした。表の次のカラムは室温のデータで、通常 291~300K の範囲で得られたもので、このカラムには 297K と題目がついている。低温での機械的性質の試験に対する次のかぎとした温度はドライアイスと混ぜた有機液体 (寒剤) で冷却して得られたもので、200~193K であるが、簡単にするために 195K として示した。液体窒素、液体水素、液体ヘリウム中の試片で行われた試験に対してはそれぞれ 77K, 20K, および 4K と示してある。これらの中間の温度で得られた試験データに対しては、例えば 144K のような場合にはその試験温度を題目として別のカラムにデータを示してある。

単位は主単位として SI を採用し、これに対応するイギリス系の単位をかつこ内に示してある。SI 単位での応力とエネルギーに対する値は通常イギリス系単位から変換したものである。大ていの場合、イギリス系単位での平均値は SI 単位に変換した後でなければ丸められていない。つまりイギリス系単位の値は、通常、SI 単位に変換後表中で表わす場合の 3 桁の数字に丸められている。このようにイギリス系単位は変換後丸められているので、この 3 桁の数字を SI 単位に変換すると、表中の対応する変換された SI 単位になるとは限らない。

機械的性質の表に用いられている略語は次のような意味である。

TUS	-Tensile ultimate strength
TPL	-Tensile proportional limit
TYS	-Tensile yield strength
Elong.	-Elongation
RA	-Reduction in area
E	-Young's modulus
E ₁	-Initial Young's modulus (composites)
E ₂	-Secondary Young's modulus (composites)
SE ₁	-Strength at transition between E ₁ and E ₂
NTS	-Notched tensile strength
CUS	-Compressive ultimate strength
CPL	-Compressive proportional limit
E _C	-Elastic modulus in compression
SUS	-Shear ultimate strength
SPL	-Shear proportional limit
G	-Shear modulus
Long.	-Longitudinal orientation
Trans.	-Transverse orientation
K _{IC}	-Plane strain intensity factor obtained on precracked bend or compact specimens according to ASTM E399
K _{IE}	-Plane strain stress intensity factor obtained on part-through surface-crack specimens (requirements for validity of these tests have not been established, but selected data are included in the compilations to indicate

the trends in the results that have been obtained according to the current state of the art)

S _N	-The greatest stress which can be sustained for a given number of cycles without fracture
H _Z	-Hertz, number of cycles per second
R	-Fatigue ratio, algebraic ratio of the minimum stress to the maximum stress in one cycle
K _t	-Stress concentration factor
S-N	

Curves-Plots of stress against number of cycles to failure on testing.

特に選定した材料の引張強さと耐力に対する平均値データ (最善値) は, 0~300K の温度範囲外でのこれらの性質の傾向を示し得るように, 全体を図形形式でプロットした. この温度範囲を超えての, いくつかの材料の引張性質を比較する必要があるときには, 適切な図形をコピーして, 他の材料に対する表からの付加データを付け加えることにより, 望みの比較をなすことができる.

2.2 熱的性質

Section 3 で示した材料の熱伝導率, 熱膨脹, および比熱についての, 0~300K の温度範囲の低温データを収集し編成したものである. 特記しない限り, データは金属については焼純した状態を, 複合材料については, 製造したままの状態を表わしている. 種々の金属および

Table 2.7

Alloy Designation:

Specification:

Form:

Dimension:

Condition:

Testing Temperature K (F)	273 (32)	100 (-280)	50 (-370)	20 (-423)	10 (-442)	4 (-452)
Thermal Conductivity						
Watts m ⁻¹ K ⁻¹						
Btu hr ⁻¹ ft ⁻¹ F ⁻¹						
No. of Spec.						
References:						
Thermal Expansion (T₂₇₃ to T)						
Longitudinal						
Percent						
No. of Spec.						
References:						
Specific Heat						
Joules kg ⁻¹ K ⁻¹						
Btu lb ⁻¹ F ⁻¹						
No. of Spec.						
References:						
Electrical Resistivity						
Ohm m						
Ohm circular mil ft ⁻¹						
No. of Spec.						
References:						

Table 2.9

Conversion Factors

Temperature (IPTS)		
$^{\circ}\text{F} = 9/5^{\circ}\text{C} + 32$ $= 9/5 (^{\circ}\text{K} - 273.15) + 32$ $= ^{\circ}\text{R} - 459.67$		$^{\circ}\text{K} = 5/9 (^{\circ}\text{F} + 459.67)$ $= ^{\circ}\text{C} + 273.15$ $= 5/9^{\circ}\text{R}$
To Convert To	From	Multiply By
Thermal Conductivity and Magnetothermal Conductivity (Thermochemical Units)		
*Watts m ⁻¹ K ⁻¹	Btu hr ⁻¹ ft ⁻¹ F ⁻¹ Btu in. hr ⁻¹ ft ⁻² F ⁻¹ Cal sec ⁻¹ cm ⁻¹ C ⁻¹ Watts cm ⁻¹ C ⁻¹	1.730 1.441 x 10 ⁻¹ 4.184 x 10 ² 1 x 10 ²
Btu hr ⁻¹ ft ⁻¹ F ⁻¹	*Watts m ⁻¹ K ⁻¹ Watts cm ⁻¹ C ⁻¹ Cal sec ⁻¹ cm ⁻¹ C ⁻¹ Btu in. hr ⁻¹ ft ⁻² F ⁻¹	5.782 x 10 ⁻¹ 57.82 2.419 x 10 ² 8.333 x 10 ⁻²
Specific Heat (Thermochemical Units)		
*Joules kg ⁻¹ K ⁻¹	Btu lb ⁻¹ F ⁻¹ Cal g ⁻¹ C ⁻¹	4.184 x 10 ³ 4.184 x 10 ³
Btu lb ⁻¹ F ⁻¹	*Joules kg ⁻¹ K ⁻¹ Cal g ⁻¹ C ⁻¹	2.390 x 10 ⁻⁴ 1
Thermal Expansion		
Percent	*m m ⁻¹ in. in. ⁻¹ cm cm ⁻¹	1 x 10 ² 1 x 10 ² 1 x 10 ²
Electrical Resistivity		
*Ohm m	Ohm circular mil ft ⁻¹ Ohm cm	1.662 x 10 ⁻⁹ 1 x 10 ⁻²
Ohm circular mil ft ⁻¹	*Ohm m Ohm cm	6.015 x 10 ⁸ 6.015 x 10 ⁶

* SI Units

合金の利用できる熱的性質のデータの全部が図形にプロットされ、カーブを視て対応できるようにした。これらのカーブから読んだデータは、Table 2.7に示すような体裁に従って、SI および英国式の両単位で特定の温度について表示してある。

熱伝導率と比熱のデータは log-log のプロットを用いて低温範囲を拡大して読み取るようにしてある。いくつかの分野では、低温でのデータをさらに拡張するための特別のカーブが含まれており、より読みやすくしてある。

熱膨張のデータは 273K を基準としてある。また、熱膨張のデータは低温で急激な変化を示さない傾向なので、データを低温域にて拡大する必要がない。

不純物、熱処理、およびその他の条件が材料の低温性

質に影響を与える。場合によつては、これらの変動の影響を示すカーブが同じ図面に含まれている。

Table 2.9は SI 単位あるいは通常よく用いられている単位のデータの転換に用いられる変換率の表である。

2.3 電気抵抗

Section 3 に掲載した材料の電気抵抗値を収集し、0 ~ 300K の温度範囲の分について編成した。このデータは特記してない限り、金属および合金に対しては焼鈍状態を、複合材料については、製造したままの状態を表わしている。種々の金属および合金についてのデータはプロットされ、カーブを視て対応できるようにされた。これらのカーブからのデータの読みは、選定した温度での値を SI 単位と英国式の単位とで、Table 2.7 に示した体裁に従って、熱的性質と共に表示した。

電気抵抗のデータは低温域については、log-log プロットを用いて拡大してある。

不純物、熱処理による変動、およびその他の条件が、低温での材料の電気抵抗に影響を与える。いくつかのグラフが、これらの変量が低温でいかに電気抵抗に影響を与えるかを示している。

電気抵抗に対する変換率が既載の Table 2.9 に含まれている。

2.4 磁氣的性質

(1) 構造用材料

超伝導機械装置関係の発展途上において、特に関心を持たれた構造用材料について、それらの磁氣的性質を決定しようとする努力が、少なくとも過去 25 年間にわたって注意されてはきた。しかし低温工学における構造材料の利用に対する最近の関心事は、磁氣的性質の測定の復活のきざしが生じてきたことである。科学技術文献から利用できるデータの大部分は、研究の関心事となる種々の低温域における磁化 (M) の測定の形か、磁化率 (k 又は χ) の測定の形になつている。これは、これらの材料の透磁率 (μ) が通常、極めて微量 (cgsem 単位で) だけ 1 からずれているということからである。

文献から利用できる場合には、場合によつては k の値は μ の代りとしてより有用であるからこのハンドブックの磁性表にはこれが示されている。容積透磁率 k は、示された質量透磁率 χ に材料の密度 ρ を掛けることによつて、 χ から得られる。 k の値は (SI 単位に用いられているように) mkSa 単位で与えられ、これは科学文献に一般に用いられている cgsem 単位を 4π 倍したものである。特に μ における変動が計算上の限界内に識別されない場合には、 χ も表中に示されている。

磁氣的性質の表には μ も mkSa 単位で示されている。 mkSa 単位の μ は、 cgsem 単位の μ を $4\pi \times 10^{-7}$ 倍することによつて得られる。 cgsem 系では $\mu = 4\pi k + 1$ である。故に $\mu_{\text{mkSa}} = (4\pi k_{\text{cgsem}} + 1) 4\pi \times 10^{-7}$ となる。

関心を持たれる構造用材料に対しては、この関係は μ を極端に小さい数値とする。しかしこれらのことは、表に示された主要な値に対して、SI 単位を一貫して使用するという規準を満足する。磁氣的性質の表から注意すべきことは、材料に適用した場合に μ が磁化力 (H) に若干依存することである。これは材料の本来固有の磁性が低い値の場合でもそうである。また銅は反磁性であり、与えられた磁場に反発する磁気モーメントを生じる。それで磁化率は負の記号を持つて示される。

(2) 超電導材料

特定の超電導材料、あるいは材料群に対する関連する性質のデータについては、超電導機械装置において最善の設計をなしとげるためには、臨界の電流密度 (J_c) 対温度 (特定の実際に適用される磁場に対しての)、あるいは臨界の磁場 (H_c) 対温度 (特定の電流密度に対しての) についてのデータを持つのが望ましい。技術的に関心を持たれる種々の材料の超電導性質を決定するために過去 10 年間大きな研究努力が進められたが、生み出されたデータのほとんど全部が、 J_c 対 H (特定温度での) の形となつている。この実験データの大多数は 4.2 K で得られたものである。これらのデータを用いての作業

は、設計技術者の側では、かなりの外挿が必要となるけれど、これが、現在、科学的文献によつて供給されるデータの全部である。このため、このハンドブックに掲載されている超電導性質の大部分は J_c 対 H のプロットの形をとつている。利用できる場合には、臨界 (あるいは転移) 温度に関するデータも示してある。掲載されたデータから、超電導度はどの成分組成の場合でも極めて金属組織に敏感であることに留意すべきであろう。

3. データ収集対象として選定した材料

このハンドブックの第 2 改訂版のためにデータを収集すべく選定した材料は Table 3.1 に示すとおりである。これらの材料を大別すると次のとおりである。

Aluminum and aluminum alloys

Copper and copper alloys

Nickel alloys

Alloy steels

Stainless steels

Titanium and titanium alloys

Special metals and alloys

Composites

Polymers

これらの材料を選定するにあたり、2つの大きな要因を考慮した。(1)はある種の低温工学の構成要素として適しているか、あるいは超電導機械装置のための低温工学域の温度で何か本質的な価値のある特性を持つているか?そして(2)は低温工学域温度での、その材料の性質データが入手できるか?である。

この第 2 改訂版には情報が入手できた溶接された材料の性質も含まれている。データが報告されていれば、溶接方法、溶加材、試験方法、および試験材料 (すなわち、溶接金属、あるいは基地金属+溶接金属) も掲載してある。

ある種の航空宇宙への適用のゆえに、低温工学域温度でのデータのかかなりの量が文献で利用できる合金がある。例えば 2219 アルミニウム合金、301 型ステンレス鋼、および Ti-5Al-2.5Sn 合金などがそうである。他の材料に対しては、文献から適用できるデータは僅かの参考文献程度に限定されるか、あるいはおそらく利用できないであろう。

選定せる合金に対する熱処理および/あるいは製造条件は低温工学に適用する場合に最も適切な条件を現わすように企てた。例えば、低温工学域温度において、じん性が望ましい程度となるような条件である。同様に、合金の条件は、その合金にとつてもつともな強度水準を現わすようであるべきである。一例を挙げると、溶接した Ti-6Al-4V (ELI) 合金についての機械的性質は、溶体化処理し、焼鈍した状態で表わされている。焼鈍した合金は、極低温において、より良いじん性を持ち、高い強度を示す。通常の侵入レベルの合金はより低い延性とじん性を示すけれども、極度に侵入度の低い合金 (ELI) と、通常の侵入含有量化した合金との両者とも考慮した。

Table 3.1 に掲げた材料は、番号付きの、section と subsection とに分けてあるが、これは現在示してあるデータと同様な番号付け方式を保持する間は個々の

Table 3.1. Nominal compositions of alloys and corresponding section numbers.

Section											
4.0.0	Aluminum and Aluminum Alloys										
4.1.0	Unalloyed Aluminum	Unified No.	Composition in Weight Percent ^(a)								
		System	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Others		
4.1.1	99.99Al	A91199							(99.45 min Al)		
4.1.2	EC	A91145							(99.50 min Al), 0.40Fe		
4.1.3	1050	A91050	0.25	0.05	0.05	0.05		0.05	(99.00 min Al)		
4.1.4	1100	A91100	1.0(Si+Fe)	0.05-0.20	0.05			0.10			
4.2.0	2000 Series										
4.2.1	2014	A92014	0.5-1.2	3.9-5.0	0.4-1.2	0.2-0.8	0.10	0.25	0.7Fe, 0.15Ti		
4.2.2	2219	A92219	0.20	5.8-6.8	0.2-0.4	0.02		0.10	0.3Fe, 0.02-0.10Ti		
4.2.3	2024	A92024		4.5	0.6	1.5					
4.3.0	5000 Series										
4.3.1	5083	A95083	0.40	0.10	0.4-1.0	4.0-4.9	0.05-0.25	0.25	0.4Fe, 0.15Ti		
4.3.2	5456	A95456		0.15	0.7	0.5	0.15				
4.4.0	6000 Series										
4.4.1	6061	A96061	0.4-0.8	0.15-0.40	0.15	0.8-1.2	0.04-0.35	0.25	0.7Fe, 0.15Ti		
4.5.0	7000 Series										
4.5.1	7039	A97039	0.30 max	0.10 max	0.25	2.8	0.20	4.0	0.4 max Fe, 0.10 max Ti		
4.5.2	7005	A97005	0.35 max	0.10 max	0.2-0.7	1.0-1.8	0.06-0.20	4.2-5.0	0.01-0.06Ti, 0.06-0.20Zr, 0.35 max Fe		
4.5.3	7006	—	0.10	0.04	0.22	2.24	0.12	4.10	0.17Fe, 0.01Ti		
5.0.0	Copper and Copper Alloys										
5.1.0	99.9+Cu	CDA No.	Composition in Weight Percent ^(a)								
			Cu	Pb	Fe	Zn	Others				
5.1.1	99.96Cu	C10100	101	99.96+				0.0003 max P, 0.001 max Pb			
5.1.2	Electrolytic Tough Pitch	C11000	110	99.9+							
5.1.3	OFHC	C10200	102	99.95							
5.1.4	Phosphorized	C12200	122	99.9+				0.02P			
5.2.0	Cu-Zn Alloys										
5.2.1	80Cu-20Zn	C24000	240	80	0.05 max	0.05 max	20				
5.2.2	70Cu-30Zn	C26000	260	70	0.07 max	0.05 max	30				
5.2.4	90Cu-10Zn	C22000	220	90	0.05 max	0.05 max	10				
5.3.0	Cu-Ni Alloys										
5.3.1	90Cu-10Ni	C70600	706	Bal.	0.05 max	1.0		1.0Mn, 9.0-11.0Ni			
5.3.2	80Cu-20Ni	C71000	710	Bal.	0.05 max	1.0 max	1.0 max	1.0 max Mn, 19.0-23.0Ni			
5.3.3	70Cu-30Ni	C71500	715	Bal.	0.05 max	0.4-0.7	1.0 max	1.0 max Mn, 29.0-33.0Ni			
5.4.0	Cu-Be Alloys										
5.4.1	Cu-Be(1.6-1.8)	C17000	170	Bal.				1.6-1.8Be, 0.20-40Co			
5.4.2	Cu-Be(1.8-2.0)	C17200	172	Bal.				1.8-2.0Be, 0.20 min (Ni+Co) 0.60 max (Ni+Co+Fe)			
5.5.0	Cu-Sn Alloys										
5.5.1	95Cu-5Sn	C51800	518	Bal.	0.02 max			4.0-6.0Sn, 0.10-0.35P			
5.5.2	92Cu-8Sn	C52100	521	Bal.	0.05 max	0.10 max	0.20 max	7.0-9.0Sn, 0.03-0.35P			
5.5.3	90Cu-10Sn	C52400	524	Bal.	0.05 max	0.10 max	0.20 max	9.0-11.0Sn, 0.03-0.35P			
5.6.0	Cu-Zr Alloy										
5.6.1	Cu-0.2Zr (Amzirc)	C15000	150	99.8				0.10-0.20Zr			
5.7.0	Cu-Cr-Cd Alloy										
5.7.1	Cu-0.4Cr-0.4Cd (PD-135)	—	—	Bal.				0.4Cr, 0.4Cd (Te deox.)			

(a) max = maximum, min = minimum.

Table 3.1. (Cninueod)

Section											
5.8.0	Cu-Al₂O₃ Alloys										
5.8.1	Cu+0.2Al ₂ O ₃ (AL-10)	—	Bal.								0.2Al ₂ O ₃ dispersion
5.8.2	Cu+0.7Al ₂ O ₃ (AL-35)	—	Bal.								0.7Al ₂ O ₃ dispersion
5.8.3	Cu+1.1Al ₂ O ₃ (AL-60) (GlidCop Alloys)	—	Bal.								1.1Al ₂ O ₃ dispersion
5.9.1	Cu-Al	C61400								6.0-8.0Al, 1.0 max Mn 0.01 max Pb, 2.5Fe, 0.20 max Zn	
6.0.0	Nickel and Cobalt Alloys										
	Unified No.	Composition in Weight Percent^(a)									
6.1.0	Ni-Cu Alloy	System	Ni	Cr	Fe	Mn	Si	C	Others		
6.1.1	K Monel (K-500)	N05500	Bal.	—	1.0	0.6	0.15	0.15	29.5Cu, 2.8Al, 0.5Ti		
6.2.0	Ni-Cr-Fe Alloys										
6.2.1	Inconel 600	N06600	Bal.	15.8	7.2	0.2	0.2	0.04	0.10Cu		
6.2.2	Inconel X-750	N07750	Bal.	15.0	6.75	0.7	—	0.04	0.8Al, 2.5Ti, 0.85Nb		
6.2.3	Inconel 718	N07718	Bal.	18.6	18.5	—	—	0.04	0.4Al, 0.9Ti, 5.0Nb, 3.1Mo		
6.2.4	Inconel 706	N09706	39-44	16	Bal.	0.35 max	0.35 max	0.06 max	0.35 max Al, 0.01-0.02B, 3Nb, 1.5-2.0Ti		
6.3.0	Controlled Expansion Alloys										
6.3.1	Invar 36	—	36	—	Bal.						
6.3.2	Ni-Span C	—	42.1(Ni+Co)	5.4	48.4	0.40	2.4Ti, 0.65Al				
6.3.3	Unnamed Inco LEA Alloy	—	39.6	—	55.4	0.22	0.12	0.01	0.22Al, 1.46Ti, 2.90Nb+Ta		
6.4.0	Pure Nickels										
6.4.1	High-Purity Ni	—									
6.4.2	Nickel "A"	—									
7.0.0	Alloy Steels	Composition in Weight Percent^(a)									
7.1.0	Nickel Steels	C max	Mn max	P max	S max	Si	Ni	Others			
7.1.1	9-Ni Steel	—	0.13	0.80	0.035	0.04	0.15-0.30	8.5-9.5			
7.1.2	18Ni(200) Maraging	—	0.03	0.10	0.01	0.01	0.10	17-19	8.5Co, 3.25Mo, 0.20Ti, 0.10Al		
7.2.0	Fe-Si Steel										
7.2.1	Transformer Steel										
7.3.0	Carbon Steels										
7.3.1	AISI 1010	G10100	0.08-0.13	0.30-0.60	0.040	0.050					
7.4.0	Other Ferrous Materials										
7.4.1	Armco Iron										
7.4.3	5-Ni Steel	0.15	0.30-0.60	0.035	0.035	0.2-0.35	5.0	0.20-0.35Mo, 0.05-0.12Al, 0.02 max Ni			
7.4.4	Iron (47-50)Ni Alloy										
8.0.0	Stainless Steels	Composition in Weight Percent^(a)									
8.1.0	300 Series	C	Mn	P max	S	Si	Cr	Ni	Mo	Others	
8.1.1	AISI 301	S30100	0.15 max	2.0 max	0.045	0.03 max	16-18	6-8			
8.1.2	AISI 304	S30400	0.08 max	2.0 max	0.045	0.03 max	1.0 max	18-20	8-10.5		
8.1.3	AISI 304L	S30403	0.03 max	2.0 max	0.045	0.03 max	1.0 max	18-20	8-12		
8.1.4	AISI 310	S31000	0.25 max	2.0 max	0.045	0.03 max	1.5 max	24-26	19-22		
8.1.5	AISI 316	S31600	0.08 max	2.0 max	0.045	0.03 max	1.0 max	16-18	2.0-3.0	10-14	
8.1.6	AISI 321	S32100	0.08 max	2.0 max	0.045	0.03 max	1.0 max	17-19	9-12		
8.1.7	AISI 303	S30300	0.15 max	2.0 max	0.20	0.15 min	1.0 max	17-19	0.6 max (or Zr)	8-10	
8.1.8	AISI 310S	S31008	0.08 max	2.0 max	0.045	0.03 max	1.5 max	24-26	19-22		
8.1.9	AISI 347	S34700	0.08 max	2.0 max	0.045	0.03 max	1.0 max	17-19	9-13		
8.1.10	AISI 410	S41000	0.15	1.0 max	0.040	0.03 max	1.0 max	11.5-13.5			
8.1.11	AISI 416	S41600	0.15	1.25 max	0.06	—	1.0 max	12-14	0.6 max	0.153 min	
8.2.0	Other Stainless Steels										
8.2.1	A-286	K66286	0.05	1.4	—	—	0.4	15	26	1.25	0.2Al, 2.15Ti, 0.003B, 0.3V
8.2.2	Kromarc-58 ^(b)	—	0.03	9.3	0.005	0.005 max	0.05	15.5	23	2.2	0.02Al, 0.008Zr, 0.016B, 0.16V, 0.17Ni
8.2.3	Armco 21-6-9	—	0.08 max	8.0-10.0	—	—	—	19.0-21.5	5.5-7.5		
8.2.4	Armco 22-13-5	—	0.06 max	4.0-6.0	—	—	1.0 max	20.5-23.5	11.5-13.5	1.5-3.0	0.1-0.3Nb, 0.1-0.3V, 0.2-0.4N

(a) max = maximum, min = minimum.

(b) Analysis of Westinghouse plate used in evaluation program.

Table 3.1. (Continued)

Section		Composition in Weight Percent ^(a)								
		Al	Sn	V	Fe max	O max	C max	N max	H max	Mn max
9.0.0	Titanium and Titanium Alloys									
9.1.0	Unalloyed Ti									
9.1.1	Ti-65A						0.20	0.07	0.015	
9.1.2	Ti-75A					0.40	0.20	0.07	0.0125	
9.2.0	Alpha Ti Alloys									
9.2.1	Ti-5Al-2.5Sn ^(c)	4.0-6.0	2.0-3.0		0.50	0.20	0.15	0.07	0.020	0.30
9.2.2	Ti-5Al-2.5Sn (ELI) ^(d)	4.7-5.6	2.0-3.0		0.20	0.12	0.08	0.05	0.0175	
9.3.0	Alpha-Beta Ti Alloy									
9.3.1	Ti-6Al-4V (ELI) ^(d)	5.5-6.5		3.5-4.5	0.15	0.13	0.08	0.05	0.015	
9.3.2	Ti-6Al-4V ^(c)	5.5-6.75		3.5-4.5						
10.0.0	Special Metals and Alloys									
10.1.0	Nb and Nb Alloys									
10.1.1	Nb									
10.1.2	Nb ₃ Sn									
10.1.3	Nb-Zr									
10.1.4	Nb-Ti									
10.1.5	Nb-Ti+Cu composites									
10.2.0	V-Ga Alloys									
10.2.1	V ₃ Ga									
10.3.1	Magnesium Alloy AZ31B (3Al, 1Zn, 0.2Mn) Mg-Al-Mn Alloy									
11.0.0	Composites									
11.1.0	Glass-Epoxy									
11.1.1	181/Epox 828									
11.1.2	1581/E-787 (58-68R)									
11.1.3	S-901/NASA Resin 2									
11.2.0	Boron-Epoxy									
11.2.1	4.0 mil Boron/2387									
11.2.2	5.0 mil Boron/2387									
11.3.0	Graphite-Epoxy									
11.3.1	AS/NASA Resin 2									
11.3.2	HT-S/X-904									
11.4.0	Boron-Aluminum									
11.4.1	5.6 mil Boron/6061									
12.0.0	Polymers									
12.1.1	PE	Polyethylene								
12.1.2	PCTFE	Polychlorotrifluoroethylene								
12.1.3	PTFE	Polytetrafluoroethylene								
12.2.1	PMM	Polymethylmethacrylate								
12.3.1	PS	Polystyrene								
12.4.1	PVA	Polyvinylacetate								

(a) max = maximum, min = minimum.

(c) Normal interstitial content.

(d) ELI = extra low interstitial type.

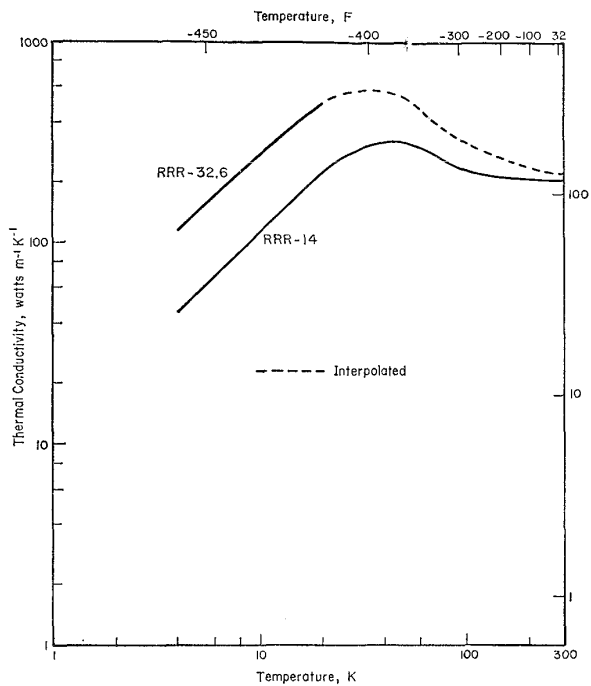


Fig. 4.1.4-C1. Thermal conductivity versus temperature for aluminum alloy 1100
-0

section および subsection 内に既掲載でない材料を付け加えられるようにするためである。

金属および合金に用いた番号付け方式は、表示の性質を見分けるために用いる付加コード文字付きで、表や図形を通じて保たれている。

コードの文字は次のとおりである。

- ME Mechanical properties
- C Thermal conductivity
- E Thermal expansion
- S Specific heat
- R Electrical resistivity
- TR Combined thermal and resistance properties
- MR Magneto-resistance
- MA Magnetic properties

このようにして、1100 アルミニウムの熱伝導率の最初の図形は Fig. 4.1.4-C1 となる。合金コード番号 4.1.4 は 1100 アルミニウム合金に対するものであり、C は熱伝導率を示し、そして 1 はこのシリーズの最初の図のためのものである。1100 アルミニウムの熱伝導率に対する図はどのテンパーの場合でもこのシリーズ中に見出される。溶接合金のデータは適当な合金の section の機械的性質 (ME) の section に示されている。