

新塑性加工技術シリーズ 8

接 合 ・ 複 合

—— ものづくりを革新する接合技術のすべて ——

日本塑性加工学会 編

コロナ社

■ 新塑性加工技術シリーズ出版部会

部会長	浅川基男	(早稲田大学名誉教授)
副部会長	石川孝司	(名古屋大学名誉教授, 中部大学)
副部会長	小川茂	(新日鉄住金エンジニアリング株式会社顧問)
幹事	瀧澤英男	(日本工業大学)
幹事	鳥塚史郎	(兵庫県立大学)
顧問	真鍋健一	(首都大学東京)
委員	宇都宮裕	(大阪大学)
委員	高橋進	(日本大学)
委員	中哲夫	(徳島工業短期大学)
委員	村田良美	(明治大学)

(所属は2016年5月現在)

刊行のことば

ものづくりの重要な基盤である塑性加工技術は、わが国ではいまや成熟し、新たな展開への時代を迎えている。

当学会編の「塑性加工技術シリーズ」全 19 巻は 1990 年に刊行され、わが国で初めて塑性加工の全分野を網羅し体系立てられたシリーズの専門書として、好評を博してきた。しかし、塑性加工の基礎は変わらないまでも、この四半世紀の間、周辺技術の発展に伴い塑性加工技術も進歩を遂げ、内容の見直しが必要となってきた。そこで、当学会では 2014 年より新塑性加工技術シリーズ出版部会を立ち上げ、本学会の会員を中心とした各分野の専門家からなる専門出版部会で本シリーズの改編に取り組むことになった。改編にあたって、各巻とも基本的には旧シリーズの特長を引き継ぎ、その後の発展と最新データを盛り込む方針としている。

新シリーズが、塑性加工とその関連分野に携わる技術者・研究者に、旧シリーズにも増して有益な技術書として活用されることを念じている。

2016 年 4 月

日本塑性加工学会 第 51 期会長 真 鍋 健 一

(首都大学東京教授 工博)

■「接合・複合」 専門部会

部会長 山崎 栄一（新潟県工業技術総合研究所）

副部会長 川森 重弘（玉川大学）

■ 執筆者

まち だ てる ふみ
町 田 輝 史（葉月温心・材料加工ミッション主宰（元 玉川大学教授））

1.1～1.4, 2.5 節

とよ	だ	ゆう	すけ		
豊	田	裕	介*	(株式会社本田技術研究所)	1.5.1 項, 8 章
おく	だ	あき	ひさ		
奥	田	晃	久	(三菱重工業株式会社)	1.5.2 項
す	が	ただ	とも		
須	賀	唯	知	(東京大学)	1.5.3 項
もり		とし	ひこ		
森		敏	彦	(名古屋大学名誉教授)	1.6.1, 1.6.2 項
いた	ばし	まさ	み		
板	橋	雅	巳	(大成プラス株式会社)	1.6.3 項
かわ	もり	しげ	ひろ		
川	森	重	弘*	(玉川大学)	2.1, 4.1 節
なり	た	とし	お		
成	田	敏	夫	(北海道大学名誉教授)	4.2 節
よし	だ	かず	なり		
吉	田	一	也	(東海大学)	2.2 節
むら	かみ	ひろ	や		
村	上	碩	哉	(元 東京工業大学教授)	2.3 節
ほし	の	みち	ひこ		
星	野	倫	彦	(日本大学)	2.4 節
おお	つか	まさ	ひこ		
大	塚	誠	彦	(旭化成株式会社)	2.6 節
おか	がわ	けい	こ		
岡	川	啓	悟	(東京都立産業技術高等専門学校名誉教授)	2.7 節
やま	ぎき	えい	いち		
山	崎	栄	一*	(新潟県工業技術総合研究所)	2.8.1 項
じん		まさ	ひこ		
神		雅	彦	(日本工業大学)	2.8.2 項, 4.6 節
すぎ	やま	すみ	お		
杉	山	澄	雄	(元 東京大学生産技術研究所)	2.8.3, 2.8.4 項
は	せ	がわ	おさむ		
長谷川			収*	(東京都立産業技術高等専門学校)	3 章
あさ	か	かず	お		
浅	香	一	夫	(浅香技術士事務所)	4.3 節
かわ	かみ	ひろ	し		
川	上	博	士	(三重大学)	4.4 節
か	とう	かず	よし		
加	藤	数	良*	(元 日本大学教授)	4.5 節, 11 章
なか	た	かず	ひろ		
中	田	一	博	(大阪大学名誉教授)	5 章

かた 片	やま 山	せい 聖	じ 二	(大阪大学名誉教授)	6 章
あり 有	が 賀		ただし 正	(東海大学名誉教授)	7 章
すぎ 杉	い 井	しん 新	じ 治	(元 住友スリーエム株式会社)	9 章
いま 今	むら 村	けん 健	こ 吾	(スリーエム ジャパン株式会社)	9 章
おお 大	はし 橋		おさむ 修	(WELLBOND 代表 (東京理科大学客員教授))	10 章
まえ 前	だ 田	まさ 将	かつ 克	(日本大学)	11 章
き 木	むら 村		みなみ 南*	(東京工業高等専門学校名誉教授)	12 章
こ 小	ばやし 林	とも 具	み 実	(東洋製罐グループホールディングス株式会社)	13.1 節
かわ 川	とう 東	ひろ 宏	し 至	(豊田通商株式会社)	13.2.1, 13.2.2 項
おお 大	たき 瀧	みつ 光	ひろ 弘	(一般社団法人日本アルミニウム協会 (執筆当時 株式会社 UACJ))	

13.2.3 項

いし 石	かわ 川	まさ 雅	ゆき 之	(三菱マテリアル株式会社)	13.3 節
はら 原	だ 田	やす 泰	のり 典	(兵庫県立大学大学院)	13.4 節
いけ 池	だ 田		たけし 毅*	(三菱電線工業株式会社)	

(*：専門部会委員) (2018 年 2 月現在, 執筆順)

荒 谷 雄	久保田 彰	中 村 保
有 賀 正	小 松 勇	蓮 井 淳
池 見 恒 夫	坂 木 修 次	福 島 貞 夫
乾 恒 夫	佐 野 利 男	藤 倉 潮 三
今 井 邦 典	佐野村 幸 夫	真 崎 才 次
大 平 洋	城 田 透	町 田 輝 史
岡 井 紀 彦	杉 井 新 治	松 岡 信 一
樺 沢 真 事	征 矢 達 也	松 下 富 春
木 内 学	田 頭 扶	横 井 秀 俊
木 村 南	時 末 光	(五十音順)
朽 木 輝 道	中 村 雅 勇	

ま え が き

日本塑性加工学会編の塑性加工技術シリーズ（全 19 巻）が発刊されてしばらくになることから、これからの 20 年を見据え、技術者育成に寄与することを目指し、また若手技術者の教科書・手引書となるよう、2014 年度より塑性加工技術シリーズの改編に着手した。その流れを受け、接合・複合分科会を中心に、『接合』（1990 年）の改編に取り組んだ。

『接合』が発刊されてから現在まで、太陽光、風力などの自然エネルギーの利用推進、自動車はもとより医療、航空機産業をつぎの成長産業と捉えた取り組み、昨今の AI・IoT の潮流など、技術革新が次々と起こっている。そのような中、内容の陳腐化に伴う見直しをベースとしつつ、新しい技術を盛り込む形で今回の改編にあたった。

接合技術は、当初は建造物や構築物を得るための技術であったが、今では日常使用している身の回りの製品から航空・宇宙産業の先端技術分野まで幅広く用いられ、付加価値の高い部品や製品を生む効率的な技術のひとつとして認識されている。反面、あらゆるものに利用されるため、分野を問わず数えきれないほど多種多様な技術となっている。これらを 1 冊の本にまとめ上げるというたいへんな作業と努力の賜として刊行されたのが『接合』である。

その流れをしっかりと受け継ぎ、新しい技術やことがらを取り入れつつ、議論を重ね進めてきた。それぞれの接合技術を深耕するというよりは、企画設計や加工といったものづくりに関わる際に活用されるよう、どんな接合技術があつてどのように使われているのか、生産技術の観点から紹介するよう努めた。

また書籍名については、ものづくりを考えた場合、必ずといってよいほど

種々の接合の組合せにより形づくられるが、接合体は基本的には複合（機能体）であり、個々の機能の重ね合わせにより新たな機能も生まれるとの分科会創始者の考えを受け継ぎ、『接合・複合』と題して分科会の思いを込めた。

今回の執筆に際しては、塑性加工学会や接合・複合分科会の方々はもちろんのこと、他の分野の方々にも広くお声掛けし、大学の先生や企業の研究者・技術者の方々より快くご協力をいただいた。執筆者の方々には、普段であれば本1冊に匹敵するような内容を数ページ以内で語るよう、無理難題を承知でお願いした。その結果、コンパクトにそのエキスをまとめていただいた。平易な表現で最新技術を紹介するなど、たいへんご苦労された内容になっている。

一例を挙げると、いまも産業界で用いられる基本的な技術については、装置や応用製品、応用技術をより新しいものになるよう努めた。一方、ここ10年あまりで大きく発展したレーザ溶接、注目のFSW（摩擦攪拌接合）や拡散接合、AM（アディティブマニファクチャリング）など、本格的に実用化に至った技術も新たに盛り込んでいる。新しいものを取り上げるにあたり、『接合』に比べ塑性加工のトーンが若干薄くなったように感じられると思うが、ご容赦願いたい。

本書が、ものづくりに関わりのある技術者の方々はもとより、学生を含む若手技術者にも接合技術を身近なものとして捉えていただき、ものづくりを行う際の接合技術の選択、あるいは新しい技術を生み出す際の気づきやヒントの一助になれば幸いである。

最後に、お忙しい中、快く執筆をお引き受けいただいた方々や、ご協力いただいた接合・複合分科会の方々に感謝申し上げるとともに、このような機会をいただいた一般社団法人日本塑性加工学会、ならびに株式会社コロナ社に御礼申し上げます。

2018年2月

「接合・複合」専門部会長 山崎 栄一

目 次

1. 序 論

1.1 接合・複合の意義	1
1.2 接合・複合の技術史	3
1.2.1 古代の接合・複合	3
1.2.2 工業における接合・複合	5
1.3 接合・複合技術の応用	8
1.3.1 接合と複合の概念と用法	8
1.3.2 技術の分類法	9
1.3.3 直接結合と間接結合による分類	10
1.4 技術の選択と展開	14
1.4.1 適用の目的意識	14
1.4.2 機能創製と接合・複合	14
1.4.3 技術展開への新たな視点	16
1.5 接合技術の主たる応用	17
1.5.1 自動車の接合技術	17
1.5.2 航空機の接合技術	23
1.5.3 究極の接合技術—常温接合—	26
1.6 接合状態の評価法	30
1.6.1 機械的試験（接合強度試験）	31
1.6.2 接合部の観察および検査	33

1.6.3 異種材接合にみる特性評価法とその標準化	34
引用・参考文献	41

2. 変形・流動接合

2.1 概 論	43
2.1.1 変形・流動接合	43
2.1.2 変形・流動を用いる接合法の種類と特徴	44
2.1.3 接合条件と接合性	48
2.2 圧 延 の 応 用	53
2.2.1 圧延接合の機構	53
2.2.2 接 合 面 率	56
2.2.3 接 合 強 度	56
2.2.4 接合強度に及ぼす因子	58
2.2.5 応 用	65
2.3 鍛造的手法の応用	68
2.3.1 押込み接合法	68
2.3.2 塑性流動結合法	72
2.4 押出しの応用	80
2.4.1 原 理 と 方 法	80
2.4.2 接 合 条 件	83
2.4.3 応 用 例	87
2.5 シェービング接合	89
2.5.1 接 合 原 理	89
2.5.2 接 合 方 法	90
2.5.3 接合強度の構成	91
2.5.4 接合条件と強度	92
2.5.5 特徴と適用可能性	94
2.6 爆 発 圧 着	95
2.6.1 原 理	95

2.6.2 接 合 条 件	97
2.6.3 応 用 例	98
2.7 電磁力による高エネルギー接合	100
2.7.1 電磁圧接の原理と衝突時間測定および電磁加工回路	100
2.7.2 電磁圧接実験	103
2.7.3 電 磁 か し め	105
2.8 その他の変形流動接合	106
2.8.1 超 塑 性 接 合	106
2.8.2 振 動 熱 接 合	109
2.8.3 半溶融バルジ接合	110
2.8.4 半 溶 融 圧 接	111
引用・参考文献	112

3. 構造締結と弾性締結

3.1 構 造 締 結	116
3.1.1 構造締結の特徴と分類	116
3.1.2 構造締結の応用と選択	120
3.2 各種構造締結	121
3.2.1 折 曲 げ 締 結	121
3.2.2 かしめ継ぎ締結	125
3.2.3 より合せ締結	128
3.2.4 せん断接合	130
3.2.5 張出し接合	131
3.2.6 その他の構造締結	133
3.3 弾 性 結 合	134
3.3.1 は め あ い	134
3.3.2 弾性結合の力学	139
3.4 焼結部品の弾性接合	144
3.4.1 焼 結 ば め	144

3.4.2 焼結部品の圧入	145
引用・参考文献	146

4. 局 部 溶 着

4.1 概 論	147
4.2 表 面 被 覆	148
4.2.1 表面被覆法の種類	148
4.2.2 溶 射	149
4.2.3 蒸 着	155
4.3 焼 結 接 合	162
4.3.1 分 類	162
4.3.2 原理と特徴およびその適用例	164
4.4 抵 抗 溶 接	180
4.4.1 概 要	180
4.4.2 抵抗溶接の原理	181
4.4.3 各種抵抗溶接	182
4.4.4 接合条件および評価	185
4.5 圧 接	189
4.5.1 圧接法の分類	189
4.5.2 圧接性に及ぼす諸要因	189
4.5.3 各種圧接法とその応用例	191
4.6 超 音 波 接 合	194
4.6.1 超音波発生の原理と接合機	194
4.6.2 超音波接合の特徴と種類	196
4.6.3 応 用 分 野	200
引用・参考文献	202

5. アーク溶接およびガス溶接などの融接法

5.1	アーク溶接	206
5.1.1	アーク溶接の特徴と種類	206
5.1.2	アーク放電とその制御	209
5.2	各種アーク溶接法とその特徴	212
5.2.1	ティグ溶接	212
5.2.2	ミグ溶接およびマグ溶接	214
5.2.3	サブマージアーク溶接	216
5.2.4	被覆アーク溶接およびセルフシールドアーク溶接	216
5.2.5	その他の関連する融接法	217
5.3	アーク溶接継手の特徴	219
5.3.1	溶接継手の形成組織	219
5.3.2	溶接欠陥	221
5.3.3	溶接変形と溶接残留応力	223
5.4	ガス溶接	224
	引用・参考文献	225

6. ビーム溶接

6.1	レーザー溶接	226
6.1.1	レーザー溶接の特徴	227
6.1.2	溶接用レーザーの種類と特徴	228
6.1.3	レーザー溶接現象と溶接部の溶込み形状	230
6.1.4	レーザー溶接条件とその溶接部の評価	234
6.1.5	レーザー溶接欠陥の生成および防止と溶接部の特性	237
6.1.6	レーザー溶接・接合の適用例	241
6.2	電子ビーム溶接	242
6.2.1	電子ビーム溶接装置	243

6.2.2 電子ビーム溶接機構	244
6.2.3 電子ビーム溶接の特徴	244
引用・参考文献	245

7. ろ う 接

7.1 概 論	247
7.2 ろ う 材	248
7.2.1 はんだ（軟ろう）	248
7.2.2 ろ う（硬ろう）	250
7.2.3 フラ ッ ク ス	255
7.3 継手の形状と設計	256
7.4 ろう接装置および接合作業	258
7.5 ろう接の応用	260
7.5.1 継手の試験・検査	260
7.5.2 実 用 例	260
引用・参考文献	262

8. 要 素 結 合

8.1 概 論	264
8.2 各種の要素結合	264
8.2.1 ボルト・ナット結合	264
8.2.2 リベット結合	267
8.2.3 公的規格外の要素結合	269
8.2.4 キー・コッター結合	271
8.2.5 ピ ン 結 合	273
8.3 簡 易 結 合	274
引用・参考文献	276

9. 接 着

9.1 概 論	277
9.2 接着のメカニズム	278
9.2.1 表面でのぬれ	278
9.2.2 界面での相互作用	279
9.2.3 接着剤の固化	280
9.2.4 接着強度の影響因子	280
9.3 接着剤の種類と特徴	283
9.4 接着強度と耐久性	285
9.5 接 着 の 応 用	289
引用・参考文献	292

10. 拡 散 接 合

10.1 概 論	293
10.2 拡散接合の種類と特徴	294
10.3 金属を接合するには	295
10.4 接合面積の増加過程	296
10.5 接合表面皮膜の挙動	298
10.6 異種金属の接合	299
10.7 拡散接合装置	300
10.8 拡散接合の適用例	301
引用・参考文献	302

11. 摩擦攪拌接合 (FSW)

11.1 概 論	303
11.2 施工パラメータ	306
11.3 ツール	307
11.4 接合装置	309
11.5 接合過程の現象	310
11.6 FSW の組織と欠陥	313
11.7 応用事例	316
引用・参考文献	318

12. アディティブマニュファクチャリング

12.1 概 論	319
12.2 各種アディティブマニュファクチャリング技術	319
12.2.1 液槽光重合法	320
12.2.2 材料押出し法	320
12.2.3 粉末床溶融結合法	321
12.2.4 その他の AM 技術	322
12.3 CAD データによる造形設計	323
12.4 応用事例	324
12.4.1 企画設計のモデルとしての利用	324
12.4.2 鋳造への応用	324
12.4.3 金型への応用	325
12.4.4 医療への応用	326
12.5 今後のアディティブマニュファクチャリング	327
引用・参考文献	328

13. 接合技術の変遷

13.1 金属缶に関わる接合技術	329
13.1.1 金属缶の分類	329
13.1.2 3ピース缶における接合技術	330
13.1.3 複合材を素材とする2ピース缶	333
13.1.4 缶蓋における接合技術	335
13.1.5 二重巻締法	336
13.2 クラッド材	337
13.2.1 金属/樹脂複合材料	337
13.2.2 金属/樹脂複合材料の接合法	346
13.2.3 非鉄系クラッド複合板	351
13.3 マイクロジョイニング	356
13.3.1 微小部品の接合	356
13.3.2 ワイヤボンディング	357
13.3.3 その他の結線方式	358
13.3.4 フリップチップボンディング用はんだバンプ形成技術	359
13.3.5 マイクロろう接	362
13.4 最近の接合技術の動向	363
13.4.1 近年の動き	363
13.4.2 機能性接合要素	364
13.4.3 材料の改質と特性開発	366
引用・参考文献	367
索引	372

1 序 論

1.1 接合・複合の意義

接合・複合は新しいとは言えないが、つねに新しい役割を与えられてきた技術である。特に近年は、工場生産の場で期待が著しく増し、旧来の手法が深化・合理化され、また新たな手法も開発されて多様化し、高付加価値の創製に不可欠の要素技術と認識されている。図 1.1 は、時代とともに接合・複合に新しい要求が加わり、役割が増大しつつあることを模式的に表現したものである。^{1), 2) †}

接合・複合技術は古来、短小部材のつなぎ合わせや部品類の組立を役割とし

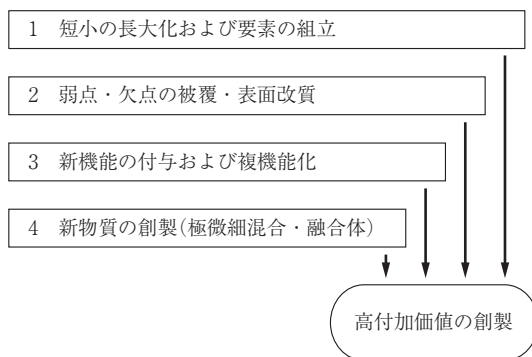


図 1.1 接合・複合が果たす役割の変遷

† 肩付き数字は、章末の引用・参考文献番号を表す。

てきた。土木・建築構造の形成、造船、車両、軌道などで構成部材をつなぎ合わせる溶接や機械部品類を結合する締結などが典型例である。工場生産ライン中に技術を組み込み、さまざまな工業製品を低コストで大量生産することにも成功している。この系譜の成熟した姿は、現代の自動車や電子製品の組立ラインにみられる。

ついで接合・複合技術は、材料や部品類の弱点・欠点を補う表面被覆の役割を担ってきた。銅板製の建材や飲食料缶で耐食性を改善するための表面処理（めっき、塗装）や、耐熱・耐食性を改善するためのホーロー処理、機械部品の硬化質を図る溶射、潤滑性を付与するふっ素樹脂被覆、金属の表面特性を改善するためのアルクラッド法、金属板や紙のプラスチック被覆（ラミネート、塗装）などが代表的事例に挙げられる。

さらに近年、新機能を持つ製品・部品を生産する役割も果たしてきている。この新機能創製技術としての見方あるいは期待の背景には、進歩・発展が著しい新素材、新合金、複合材料、その他の高性能材料などを安価に製品に組み込みたいとの強い要請もある。

先進高性能材料は、一般に長さや厚みが小さく高価である。また、それぞれ比強度、電気・電子特性、耐熱性、耐食性などに優れた性能・特性を持っているが、硬脆性だったり、逆に粘弾性だったりして、成形加工性を保有しない難加工性材料である。たとえ機械加工や塑性加工で形状変更できたとしても、複雑な条件下で実用するために必要な他の特性を備えているか、疑わしい。むしろ成形過程で、せっかくの卓越した特性が損傷・破壊される懸念が大きいというべきである。

したがって、難加工性高性能材料を活用して高付加価値を創製するためには、これを加工可能な材料と結合して製品・部品に取り込むのが合理的である。すなわち異種材を結合する接合・複合が最有力の手法になる。

他方、用途の拡大に伴って、従来の製品性能に別の機能・特性を追加した複機能体が求められるようになった。この創製には、汎用基材に異種材を結合する形の接合・複合が効率よく用いられる。

例えばICなどエレクトロニクス部品の組立は高性能難加工性材料の活用であり、異種材と組み合わせた防音、制振、また撥油性を持たせた銅板は複機能化とみることができる。

このように接合・複合は、短小の長大化、弱点・欠点の改善、そして新・複機能体の創製を、最も効率的に実現してきた。この伝統の上に立って、近い将来、微視的レベルでの混合・融合技術を用いて斬新な材料・製品・部品の創出にも意を注ぎたいものである。

1.2 接合・複合の技術史

1.2.1 古代の接合・複合

新たな展開を図ろうとするとき、その歴史を遡って現在の立ち位置を確認し視座を確保することも必要である。接合・複合の技術史を一望してみよう。ただし記述は、時代を遡るほど確実な資料・記録は存在しないため、断片的情報によるところが多く、その時期などは現時点での考古学上の出土・考証に基づくもので、将来変わる可能性もあることをお断りしておく。

人類は発祥からほどなく、身にまとう布を蔓^{つる}、縄^{なわ}、紐^{ひも}で縫い、また蔓や紐で結んだ。さらに石材と木材を組み合わせた武器や農耕具（石斧^{おの}、石鋤^{くわ}、石鋤^{すき}など）を用いた。縫い・結いが編みに技術発展したであろうことは想像に難しく、これは今日のFRP部品生産における強化繊維の織物技術と同類の発想である。

ほぼ同時に、豊富にある粘土を成形し日干し土器を作った。その際、壺などの深い容器類は、粘土を図1.2に示すような輪積み成形する手法³⁾もとった。輪積みは今日の積層成形方式や3Dプリンター付加成形方式（additive manufacturing）、日干しは今日の金属の焼結法

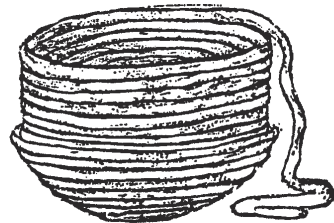


図1.2 輪積み式による土器の製作³⁾

や陶磁器の窯焼きと同類である。

古代エジプトではナイル流域の粘土を日干し煉瓦にする際、土に短い藁^{わら}を混入して強度を出した。この手法は、日本でも古くから土壁・土蔵や煉瓦積み構造に見られる。またかなり後になるが、15世紀末にコロンブスが南米に達したころ、先住民が藁に天然ゴム樹液を染み込ませて作った雨合羽や長靴を身に付けていたと伝えられる。これらの製法は今日の繊維強化複合材料（fiber reinforced composites）の概念と同類である。

自然銅がBC 30世紀ごろメソポタミアで発見され、ついで美麗で強度に優れる青銅も発明され、祭器、武器、馬具、装身具、また生活道具に用いられた。BC 3世紀ごろから、リベット、鍛接、溶接（鋳掛け）で金属部品を接合した。同じころ、金、銀などを器具の溝にはめ込む象眼（象嵌）細工も始まっている。

ヒッタイトはBC 15世紀ごろ、銅合金よりも強度のある鉄の製法を発明し、周囲を制圧し強大国になった。BC 12世紀初頭に滅亡した後に、その製鉄部品技術が周辺諸国に普及した。鍛冶屋が鉄を赤熱して鍛造し鍛錬成形し、武器をはじめ農機具、生活道具などを製作した。このとき重ね合わせて打つ鍛接も行われている。はめ込みやろう付による銅合金での装飾⁴⁾も見られた。釘職人は、細く短い鉄棒の一端を尖らせ他端に頭をつけた金釘を作った。古代エジプトでは、ファラオの木棺や副葬品箱の組立に利用された。後世イエスが磔^{はりつけ}にされたとき（AD 33年）、手足に打ちつけられた鉄釘（聖釘）もこの種のものだった。

日本では、渡来人が住みつき、土製や木製の食器、祭器、装身具などを作り、これらの接着・装飾に漆を塗った⁵⁾。縄文人によりBC 70世紀ごろに埋められた装身具などの副葬品の中に、漆を塗ったものが出土している⁶⁾。漆器作りは日本の伝統技術として今日まで伝承されており、英語のjapanは漆器を意味する。漆塗りは、被覆による表面改質技術の始まりといえる。

青銅製の武器や銅鐸もBC 2世紀ごろには製作されていて、これにはろう付や鋳掛けも行われた形跡があるという。後世の大仏などの巨大青銅器の建立は、鋳掛け技術を進歩させた鋳物師の業である。鉄はBC 3世紀ごろから作ら

れ鉄製農具が普及した。BC 3 ～ BC 1 世紀（弥生時代）には、鉄製武器も鍛造され、そこでは心金と皮金の鍛接も行われた。刀剣類の組立には木製目釘が使われたが、AD 1 ～ 5 世紀（古墳時代）には、鉄製や青銅製で角形断面の和釘や鉄（リベット）が作られ、武具や棺の部品の止め具として用いられている。

武家勢力が現れた 10 世紀ごろから、鋭い切れ味と強靱（じん）な性質を兼ね備えた日本刀が求められ、刀工は軟鋼心と硬鋼刃を鍛接した刀身を鍛えることで応えた。刀鍛冶は伝統技術として今日に継承されている。鉄製武器の発達とともに、鍛造された短冊状鉄板を鉄止めした甲冑や鉄楯も出現した。さらに、鑄造による鉄斧や仏像が大陸から伝わると、鉄の鑄掛け技術が普及した。鑄掛けとは、鑄掛屋がひび割れや穴ができた金属製品を補修するため溶加材を流し込む接合技術で、今日でも行われている。

1.2.2 工業における接合・複合

近代になると製造技術は、職人あるいは家内手工業に頼った多種少量生産型から、機械力を活用した工場での標準製品の大量生産型に移行する。ここでは、その始まりを 18 世紀後半から 19 世紀前半に起こったイギリスの産業革命と置く。

大型構造物の建造などに必須のコンクリートやモルタルは、骨材の接合剤にセメント（cement）を用いた複合材料である。セメントは、イギリスの J. Aspdin が発明し、1824 年に英国特許を取得し、Portland Cement の工場生産を始めた。

鉄筋コンクリート（reinforced concrete）は、フランスで J.L.Lambot が鉄網埋込みコンクリート小船を作った 1850 年に始まる。その後 J. Monier が 1867 年に格子形鉄筋コンクリートの専売特許を得て、1887 年にドイツの M. Koenen が鉄筋コンクリートはりの力学的計算を発表して、今日の建築技術の基礎が固められた⁷⁾。

木製ねじは、BC 1 世紀には金製のプレスレット、馬具、鎧などの止め具に使われている。円筒表面に作った螺旋の物体移動の仕組みじたいは BC 3 世紀

索引

【あ】	
亜鉛めっき鋼板	187
アクチュエータハウジング	77
アーク長	210
——の自己制御作用	211
アーク電圧	210
アーク熱効率	211
アーク放電	209
アーク溶射	151
アーク溶接	18, 206, 207
アーク溶接電源	209
圧延シーム接合	67
圧延接合	53
熱間加圧焼結	179
熱間加圧接合	178
圧縮残留応力	71
圧接下限表面積	52
圧接限界	49, 52
圧接限界線	52
圧接法	189
厚肉円筒	139
圧入	118, 131, 134, 137, 140, 145, 174
圧粉	166
圧粉磁心	177
圧粉体	171, 172, 173, 174
アディティブマニユファクチャリング	319
アプセット溶接	184
アルクラッド	2
アルミダイカスト薄肉管	77
アルミニウム基クラッド複合板	351
アルミニウム合金	187

アルミニウム被覆銅線	81
アンカー効果	71
アンカー構造	346
【い】	
イオン衝撃法	299
イオンプレーティング法	158
鋳掛け	5
異材継手	99
異種金属	299
——の接合	61
異種材	8, 73
異種材接合	148
異種材料	188
異速圧延接合	67
一次結合	279
一体化動作	8
イナートガス	212
陰極点	213
インサート金属	294
インパクト缶	330
【う】	
ウェットプロセス	346
ウェット法	148
ウェルドボンド	188
打込み鋲接	13
【え】	
液相	110
液相拡散接合	167, 294
液相焼結	168
液槽光重合法	320
エレクトロガス溶接	218
延性低下割れ	222

【お】	
遅れ割れ	223
オージェ電子分光分析	298
押し込み	68
押し込み角度	68
押し込み荷重	70
押し込み接合法	68
押し込み量	70
押出しかしめ	126
オープンバット法	191
折曲げ締結	117, 121
温・熱間加工	53
【か】	
加圧荷重	74
加圧時間	191
加圧部段差面積	80
加圧力	185, 187
外硬内軟複合材	83
介在物	299
開先	207
解体	8
外部特性	210
化学的接合	106
拡散	296, 298
拡散接合	47, 50, 189, 293
拡散接合型コンパクト熱交換器	302
拡散接合装置	300
拡張表面活性化接合	27
攪拌部	314
カーケンダルボイド	300
かしめ	44
かしめ接合	134

かしめ継ぎ締結	125	【く】	固相圧接	147
ガス圧接	293		固相拡散接合	178, 294
ガス式溶射法	149		固溶強化	299
ガスシールドアーク溶接法	208		混 合	9
ガス溶接	224		混合則	9
ガス溶断法	225	【け】	混合体	9
ガソリンインジェクタ	76		コンフォーム連続押出し	83
刀鍛冶	5		【さ】	
可変バルブタイミング機構	77		再圧縮・再焼結工程	169
カムインナーピース	70		再結晶温度	53, 191
カムピース	71		再結晶温度比	50
ガラス転移温度	281		サイジング	175
簡易締結	10, 13	【き】	最適接合・複合プロセス	14
還元反応	299		再熱割れ	222
嵌 合	73		材料押出し法	320
間接結合	15		材料噴射法	322
間接結合方式	10, 12		サブマージアーク溶接	216
機械的締結	19	【こ】	酸化物	299
			3次元積層造形法	319
			酸素アセチレン溶接	225
			酸素固溶度	299
			サンドブラスト	281
気 孔	176, 179, 223	【こ】	【し】	
気孔率	177		ジェットエンジン	23
基 材	8		シェービング接合法	89
機能設計	15		紫外線硬化樹脂	319
機能接合	162, 163		指向性エネルギー堆積法	322
機能創製	14	高温 TFT 薄膜トランジスタ	自動溶接	208
キーホール	218		絞り・再絞り缶	329
凝固割れ	222		絞り・しごき缶	329
共晶組成	249		締めりばめ	134, 139
凝着・焼き付き	71		シーム溶接	180, 184
極性比率	212	高温圧接	締め代	134, 139, 141
局部溶着法	10, 147		弱接着	26
金属学的結合	44		シャフト	70, 71
金属間化合物形成型	300		充てん率	68
金属系積層造形装置	324		しゅう動	179
金属ジェット	96, 97	高温割れ	主部材	8
金属 / 樹脂サンドイッチ板	338		常温圧接	293
金属 / 樹脂複合材料	337		常温接合	26
金属積層造形切削加工			焼 結	148, 169, 170, 171
複合機	325			
		恒久的接合		
		航空機		
		航空機用クラッド材		
		高周波溶接		
		硬脆材の結合		
		高性能セラミックス		
		構造締結		
		構造用接着剤		
		拘束リング		
		後退側		
		極低温用異材継手		
		コスト低減		
		固 相		

焼結温度	168	接 合	8		
焼結拡散接合		接合圧力	60		【そ】
170, 171, 172, 173		接合温度	60	相互拡散	299
焼結カム	168	接合開始温度	295	相対すべり	50
焼結接合	162	接合界面	36	相対すべり量	49
焼結ばめ	144, 170	接合強度	45, 56, 164, 172	相対密度	164
焼結部品	163, 174	接合強度試験法	31	塑性変形	296
衝突時間	103	接合強度比	57	塑性変形能	78
衝突速度	104	接合クリアランス	166	塑性流動	43
消耗電極式	207, 208	接合限界圧下率	54	塑性流動性	108
ショルダー	303	接合効率	32	塑性流動層	96
新 NMT 処理	35	接合材	8		【た】
新機能付加	14	接合状態の評価法	30	耐摩耗	169
真 空	300	接合助材	10	多孔質	163, 176
真空蒸着法	156	接合設計	15	脱ろう	168
真实接触面	182	接合特性	37	タングステンイナートガス	
新生面	48	接合表面皮膜	298	アーク溶接	212
振動熱接合	109	接合・複合	1, 8	タングステン電極	212
		接合面積	296	炭酸ガスアーク溶接	214
【す】		接合面の粗さ	296	単純シェービング接合	90
垂下特性	211	接合面率	55, 56	弾性結合	12, 134
水素結合	279	接触角	278	鍛 接	293
水素割れ	223	接触腐食	299	炭素繊維強化プラスチック	
隙間ばめ	134	接 着	25, 43, 177, 277		23
スクラッチブラッシング	59	接着缶	329	断熱被膜	153
スタッド溶接	219	接着結合	280		【ち】
スパッター現象	215	接着剤	13, 177, 277, 350	チタンクラッド銅複合材	87
スパッター蒸着法	157	接着接合	25	中間材の利用	64
スポット溶接	18, 180, 181, 182, 186, 188	接着継手	26	中間ばめ	134
スポット溶接換算打点	20	セメント	5	中空部品	301
寸法精度	175	セルフシールドアーク溶接	208, 216, 217	超音波	33, 194
		セルフピアスリベット	269, 350	超音波接合	110, 194
【せ】		船外機用フライホイール	75	超音波接合機	196
成形接合	95	前進側	304	超高真空環境	27
清浄化	295	せん断加工	109	超塑性	106
清浄化促進	299	せん断接合	130	超塑性現象	297
制振銅板	340	せん断接合強度	91	超微粒子溶射	154
静水圧応力	73	線爆溶射	152	直接結合方式	10, 15
静水圧押出し	47, 82	線膨張係数	165, 172, 282		【つ】
積層圧粉体	169	線膨張量	171	通電時間	185
積層曲げ	14	全率固溶型	300		
積層容器成形	14				

継手	207	【ね】	パンチ押込み量	74		
継手形状	207		パンチ面圧	74		
継手効率	48		ねじ切り旋盤	6		
ツール	303		ねじ締結	265		
			熱影響部	220, 314		
【て】		熱応力	143, 144	【ひ】		
	ティグ溶接	212	熱加工影響部		314	
	締結力	139	熱可塑性樹脂		8, 320	
	抵抗発熱	181	熱間圧延		46	
	抵抗溶接	6, 147	熱間圧接		293	
定電圧特性	211	熱間押し出し接合	81	光CVD	161	
低融点金属	191	熱硬化型一液ペースト状		光硬化型接着方式ファスナー		
鉄筋コンクリート	5	エポキシ接着剤	290	ナー	350	
電気式溶射法	151	熱硬化性樹脂	8	光造形法	320	
電気めっき法	361	熱交換器用クラッド材	352	非消耗電極式	207	
電極-母材間距離	210	熱伝導	182	ひずみ	46	
電極ワイヤ	215	熱膨張差	299	被着材	278	
電磁加工回路	102	熱膨張量	173	引張接合強度	31	
電子ビーム	226	熱溶解積層法	320	引張せん断	31	
電食	20	熱容量	183	非鉄系クラッド複合板	351	
電流密度	182,186	粘着テープ	13	非破壊検査	33	
【と】		【は】	被覆アーク溶接	216		
	銅クラッドアルミニウム線		86	日干し土器	3	
	銅合金		165	冷やしばめ	134, 139	
	同種材接合		148	ヒューム	215	
	銅被覆銅線		83	鋕接	13	
銅被覆超電導線	86		表面活性化	27		
銅溶浸接合	164, 165	ハイブリッド	16	表面活性化接合	26	
ドライプロセス	346, 348	ハイブリッド型	322	表面処理	148, 280	
ドライ法	148	爆着圧延	99	表面積拡大比	49	
【な】		爆発圧接	293	表面張力	278	
	内硬外軟複合材	83	爆発圧着	95	表面被覆法	148
	ナゲット	181, 184, 186	爆発溶射	151	表面皮膜	298
	鉛含有はんだ	248	爆薬	95	【ふ】	
	鉛フリーはんだ	248	剥離強度	31		
難加工性材料	2	バットシーム溶接	185	ファスナー接合		24
【に】		はめあい	134	ファンデルワールス結合		279
	二重巻締	336	バリ	25		フィラー材
	二相分離型	299	張出しかしめ	126	フィルム	25
	2段シェービング接合	90	張出し接合	131	フィルム状熱硬化型接着剤	286
			バーリングかしめ	126	不活性ガス	212, 300
		バルジ接合	110	複機能化	14	
		パルス溶接	215	複機能体	2	
		半自動溶接	208	複合	8	
		はんだ	248	複合カムシャフト	70	
		はんだ缶	329	複合材料		
		はんだ付	247			

複合則	9		融 合	9	
複合体	8	【ほ】	遊星圧延機	65, 66	
副部材	8	放電電流	103	融 接	43
ふっ素樹脂被覆	2	母材部	314		
フライホイール式	192	ボ ス	111	【よ】	
ブラインドリベット	268	ホットワイヤティグ法	212	予穴あけ形式	13
プラスチック	7	ボール搭載法	360	陽極化処理	59
プラスチック被覆	2	ボルト締めランジュバン型		溶 射	2, 148
プラズマ CVD	161	電歪振動子	195	溶射材料	152
プラズマ溶射	151	ボルト・ナット	6	溶射被膜特性	153
プラズマ溶接	217	ポロシティ	234	溶製銅	173, 174
フラックス	216	ホーロー処理	2	溶 接	43, 175
フラックスコールド溶接		ボンド部	220	溶接缶	329
ワイヤ	217			溶接機	183
フラッシュ溶接	180, 184	【ま】		溶接金属部	220
フランジ	111	マグ(MAG)溶接	214	溶接欠陥	221
フランジ部品植込み接合法		曲 げ	44	溶接残留応力	223
	71	曲げかしめ	126	溶接助材法	12
フリップチップボンディング		曲げ剛性	342	溶接電源特性	210
	359	曲げ接合強度	31	溶接電流	185, 186
プリプレグ	13	摩擦圧接	192, 293	溶接変形	223, 224
ブルーム	232	マルチマテリアル化	337, 350	溶接法	6
フレーム溶射	149			溶接ロボット	182
プロジェクション溶接	183	【み】		要素締結法	12
プローブ	303	ミグ(MIG)溶接	214	溶融境界部	220
ブローホール	175	密着促進	294, 297	より合せ締結	128
分子間力	279				
粉末床溶融結合法	321	【む】		【ら】	
粉末冶金	163, 170, 178	無潤滑切削	48	ラミネート化粧金属板	337
分 離	8	【め】		ラミネート材	334
【へ】		面接合	111	【り】	
バークライト	7			リベット結合	267
ペースト	25	【も】		リベット・ファスナー	350
ペースト印刷法	359	毛細管力	177	リモートレーザ	19
ヘミング結合	117	木製ねじ	5	硫化物	299
ヘミングプレス	124	モータコア	177	流動結合法	10
変形接合	189	【や】		流動成形	109
変形抵抗	47, 53				
変形抵抗比	83	焼ばめ	134, 139, 143	【れ】	
変形能	46	【ゆ】		冷間圧接	98, 189, 293
				冷間深絞りプレス成形	342
		有機接着剤	29	レーザ	222

レーザー焼結法	321	ろう材	166, 167, 248		
レーザー蒸着法	156	ろう接	247		
レーザーブレージング	19	ろう付	12, 24, 166, 247		
レーザー溶接	18, 176	ロケットの推力可変噴射器	301		
				【わ】	
				ワイヤブラッシング	59
				ワイヤボンディング	357
【ろ】					
ろ う	248				

		【A】		【H】		【S】	
AM	319			HAZ	220	SPF/DB	106, 108
		【C】		HIP	178, 179	SPR	19
CFRP	19			【I】		STEM-EDX	33
CVD	148, 155, 160			IT 基本公差等級	175	【T】	
		【E】		【M】		TAB	359
EN/EP 比率	213			MAG 溶接	214	TFS	330
		【F】		MIG 溶接	19, 214	TIG 溶接	212
				MOCVD	161	TLP 接合	294
FEW	19			【N】		【W】	
FRM	8					WSE	21
FRP	7			NMT	34	【X】	
		【G】		NMT 処理	34	X線 C T	33
GFRP	19			【P】		【Y】	
				PVD	148, 155	Young-Dupre の式	279
				PZT	195		

接合・複合——ものづくりを革新する接合技術のすべて——

Joining and Complex

—— In-depth Technology of Joining, Innovating Creative Manufacturing ——

© 一般社団法人 日本塑性加工学会 2018

2018年4月26日 初版第1刷発行

検印省略

編 者 一般社団法人
日 本 塑 性 加 工 学 会
発 行 者 株式会社 コロナ社
代 表 者 牛 来 真 也
印 刷 所 萩 原 印 刷 株 式 有 限 公 司
製 本 所 株式会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発 行 所 株式会社 コ ロ ナ 社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03) 3941-3131 (代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-04378-5 C3353 Printed in Japan

(高橋)



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。
購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。
落丁・乱丁はお取替えいたします。