

# 進化するテラーメイドコンポジット絶縁材料

～絶縁技術を革新するコンポジット材料創成を目指して～

## 進化するテラーメイドコンポジット絶縁材料に関する 調査専門委員会 編

### 目 次

<b>1. はじめに</b> .....	<b>3</b>	<b>6. ポーラスコンポジット</b> .....	<b>61</b>
1.1 電力の安全・安心を支える絶縁材料	3	6.1 緒言	61
1.2 ポリマーコンポジット一般	3	6.2 ポーラス構造粒子	61
1.3 テラーメイドコンポジット		6.3 ポリマー発泡体	63
絶縁材料とは？	4	6.4 マイクロポーラスコンポジット	64
1.4 注目されるテラーメイド技術	5	6.5 ナノポーラスコンポジット	66
1.5 絶縁材料に必要な特性	6	<b>7. 注目すべき新規コンポジット</b> .....	<b>69</b>
1.6 本技術報告の目的	10	7.1 自己修復コンポジット	69
<b>2. フィラーとポリマーの選択指針</b> .....	<b>11</b>	7.2 セルロースナノファイバー分散 コンポジット	71
2.1 まえがき	11	7.3 バイオマス由来エポキシ樹脂を用いた コンポジット	72
2.2 調査方法	11	7.4 絶縁劣化エネルギーを吸収するフィラー を分散したコンポジット	73
2.3 調査結果	11	7.5 ポリアニリン修飾フィラー分散コンポジット	75
2.4 まとめ	14	7.6 酸化グラフェン分散コンポジット	76
<b>3. ナノコンポジット</b> .....	<b>15</b>	7.7 低粘度コンポジット	78
3.1 テラーメイドされた 機能性フィラーの創製	15	7.8 ポリマーブレンド	79
3.2 テラーメイド・ナノコンポジット の特性	19	7.9 光学用ナノコンポジット	80
3.3 ナノフィラーの界面モデルの進展	27	7.10 サンドイッチ構造ナノコンポジット	81
<b>4. ナノマイクロコンポジット</b> .....	<b>33</b>	7.11 フラーレン分散コンポジット	83
4.1 ナノフィラーとマイクロフィラーの 組み合わせ	33	<b>8. コンポジットの計算機シミュレーション</b> .....	<b>84</b>
4.2 ナノフィラーとマイクロフィラーの 共添加による熱伝導率の向上	35	8.1 緒言	84
4.3 ナノフィラーとマイクロフィラーの 共添加が誘電・絶縁特性に与える影響	37	8.2 誘電特性	85
4.4 ナノフィラーとマイクロフィラーの 共添加が機械的・熱的特性に与える影響	45	8.3 電荷輸送特性	87
<b>5. マイクロコンポジット</b> .....	<b>48</b>	8.4 空間電荷特性	90
5.1 緒言	48	8.5 トリーイング進展	92
5.2 誘電率を傾斜させたコンポジット材料	48	<b>9. 実機器への応用と今後の展望</b> .....	<b>95</b>
5.3 フィラー配向を制御した コンポジット材料構造	52	9.1 回転機	95
5.4 3Dプリントによるマイクロコンポジット の成形技術	58	9.2 受配電機器 (モールド機器)	96
		9.3 開閉装置	97
		9.4 電力ケーブル	99
		9.5 エレクトロニクス機器 (パワーモジュール)	101
		<b>添付資料</b> .....	<b>103</b>

# 進化するテラメイドコンポジット絶縁材料に関する 調査専門委員会 委員

委員長 田中 祀捷(早稲田大学)  
幹事 小迫 雅裕(九州工業大学)  
幹事 今井 隆浩(東芝エネルギーシステムズ)  
幹事補佐 栗本 宗明(名古屋大学)  
委員 井上 亮(日本ガイシ)  
岩田 晋弥(大阪産業技術研究所)  
大木 義路(早稲田大学)  
大嶽 敦(日立製作所)  
太田 高志(パナソニック)  
岡田 重紀(タカオカ化成工業)  
岡本 健次(富士電機)  
笠松 直生(ナガセケムテックス)  
岸 直哉(日本ゼオン)  
熊田 亜紀子(東京大学)  
黒川 徳雄(電気機能材料工業会)  
佐藤 正寛(東京大学)  
清水 敏夫(東芝エネルギーシステムズ)  
関口 洋逸(住友電気工業)  
高田 達雄(エキスパート)

委員 田中 康寛(東京都市大学)  
遠山 和之(沼津工業高等専門学校)  
永田 正義(兵庫県立大学)  
萩原 崇之(明電舎)  
早川 直樹(名古屋大学)  
菱川 悟(ハンツマン・シージャホン)  
藤田 道朝(昭和電線ケーブルシステム)  
三枝 哲也(古河電気工業)  
三坂 英樹(電力中央研究所)  
三村 研史(三菱電機)  
村上 義信(豊橋技術科学大学)  
門田 健次(デンカ)  
山下 太郎(東光高岳)  
吉満 哲夫(東芝三菱電機産業システム)  
途中退任 加納 義久(古河電気工業)  
途中退任 桜井 貴裕(ビスキヤス)

備考) 委員は50音順に記載

委員会解散時(2018年6月)の所属を記載

途中退任委員は退任時の所属を記載

1.2 ポリマーコンポジット一般

1. はじめに

1.1 電力の安全・安心を支える絶縁材料

近年、「安全・安心」という言葉をよく耳にするようになった。私たちが、安全に、安心して電気を使用するために、電気を作る発電機、電圧を変換する変圧器や電流遮断を行うスイッチギヤなどの受配電機器は必要不可欠である。図1.1に示すように、火力・水力・原子力などで発電された電力は、一次変電所、中間変電所、配電用変電所、柱上変圧器から配電され、工場やビル、住宅などで受電することになる。

発電機・スイッチギヤ・変圧器などの電力機器において、電位を維持するための電気絶縁技術は、機器の要である。特に、電気絶縁材料が担う役割は非常に大きく、材料の特性が、機器全体の総合性能に大きく影響する。絶縁材料は、目立たないが、電力機器の安全・安心を確保するための、縁の下の力持ちのような存在である。

絶縁材料の研究開発では、望ましい材料特性を得るため、ポリマーと無機フィラーによるコンポジット(ポリマーコンポジット)技術が注目されている。特に、誘電率の分布を制御し、機能性を有する材料システムを開発しようとする試みなど、高性能な絶縁材料、および複数機能をもつ絶縁材料を希望通りに創製(テーラーメイド)しようとする技術が追及され、日々進化している。

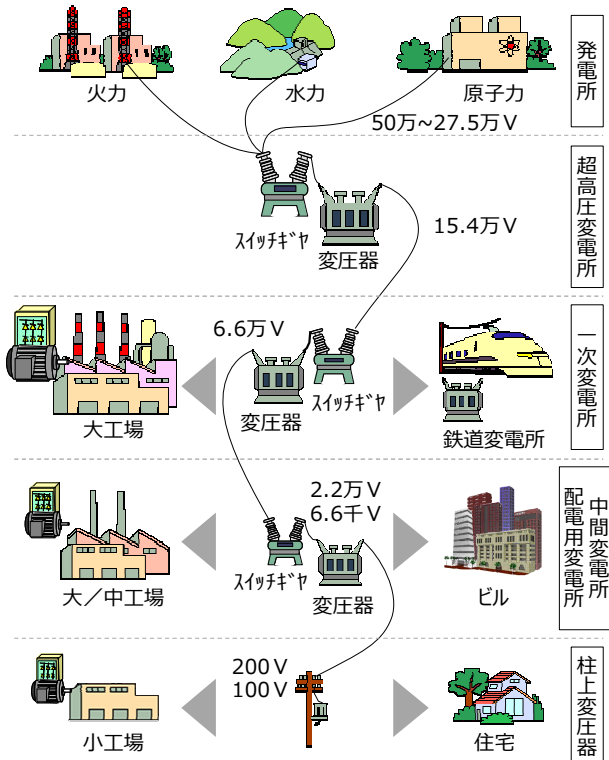


図 1.1 電力供給の経路

Fig. 1.1 Electric power distribution.

ポリマーコンポジットはポリマーに無機フィラーを充填した材料で、双方の材料の特性を併せ持つことに特徴がある。ポリマーコンポジットのコンセプトは非常に古い。土と植物繊維による土堀、木材、獣骨、膠などによる弓にも見られる。

ポリマーは21世紀入ると開発が促進され、その優れた加工性・成型性と相まって、広範囲の用途展開が図られた。1940年代になると、種々のポリマー(プラスチック)が大々的に用いられるようになった。代表的なポリマーの例を表1.1に示す。ポリマーは熱可塑性樹脂と熱硬化性樹脂に分けられる。また熱可塑性樹脂は汎用ポリマー、エンジニアリングプラスチック、スーパーエンジニアリングプラスチックに分類されている。ポリ塩化ビニル、ポリエチレン、ポリスチレン、ペークライトが生活に登場し、1960年代以降ポリエチレンを初めとする種々の汎用プラスチック(PE, PP, PVC, PSなど)が普及した。電気絶縁材料としては主としてこの汎用プラスチックが用いられている。エンジニアリングプラスチック(エンブラ)は機械的強度に優れ、荷重がかかる用途などに用いられてきた。主鎖が炭素元素

表 1.1 代表的な実用ポリマーの例

Table 1.1 Examples of practical polymers.

分類	樹脂名	略号		
熱可塑性ポリマー	汎用プラスチック	ポリ塩化ビニル	PVC	
		ポリエチレン	PE	
		ポリプロピレン	PP	
		ポリスチレン	PS	
		アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン共重合体	ABS	
		アクリロニトリル・スチレン共重合体	AS	
		ポリメチルメタクリレート(アクリル樹脂)	PMMA	
		ポリビニルアルコール	PVA	
		ポリ塩化ビニリデン	PVDC	
		ポリエチレンテレフタレート	PET	
	エンジニアリングプラスチック(エンブラ)	汎用エンブラ	ポリアミド(ナイロン)	PA
			ポリアセタール	POM
			ポリカーボネート	PC
			ポリフェニレンエーテル	PPE
			ポリブチレンテレフタレート	PBT
		スーパーエンブラ	超高分子量ポリエチレン	U-PE
			ポリフッ化ビニリデン	PVDF
			ポリスルホン	PSF
			ポリエーテルスルホン	PES
			ポリフェニレンサルファイド	PPS
熱硬化性ポリマー	ポリアリレート	PAR		
	ポリアミドイミド	PAI		
	ポリエーテルイミド	PEI		
	ポリエーテルエーテルケトン	PEEK		
	液晶ポリマー	LCP		
	ポリテトラフルオロエチレン(テフロン)	PTFE		
	フェノール樹脂(ペークライト)	PF		
	ユリア樹脂	UF		
	メラミン樹脂	MF		
	不飽和ポリエステル	UP		
エポキシ樹脂	EP			
シリコン樹脂	SR			
ポリウレタン	PUR			
ジアリルフタレート樹脂	PDAP			