

マルチクライアント調査報告書

(抜粋編)

次世代高速・大容量伝送市場と対応材料技術展望 2022

-デジタルツイン/サステナブル社会実現を目指す Beyond 5G での材料技術変化を読む-

2022年2月28日

(有)カワサキテクノロジー

## 内容

第1章	はじめに	1
1-1	高速大容量通信が求められる背景	1
1-2	各通信（光、電波、電気）の特徴	2
1-3	Beyond 5Gに求められる機能	12
1-4	今回の調査内容	17
第2章	第5世代移動通信(5G)市場動向	18
2-1	5G展開状況	18
2-2	ユースケース	24
2-2-1	遠隔医療	25
2-2-3	自動運転	38
2-2-3	ローカル5G	47
2-3	5G関連部品展開状況	49
2-3-1	基地局レドーム	49
2-3-2	透明アンテナ	54
2-3-3	RFフィルタ	63
2-3-4	スマートフォン筐体	68
第3章	Beyond 5Gに向けた開発動向	74
3-1	Beyond 5Gを巡る動き	74
3-2	通信システムの変化	80
3-2-1	ネットワーク構造の変化	80
3-2-2	情報伝送システムの変化	85
3-2-3	無線電力伝送	94
3-3	テラヘルツにおける物性評価	97
3-4	メタマテリアル技術	100
3-4-1	メタマテリアルとは	101
3-4-2	メタマテリアルの光領域での応用	104
3-4-3	メタマテリアルの電波領域での応用	106
3-4-4	Beyond 5Gに向けたメタマテリアルのテラヘルツ領域への応用	112
第4章	高周波対応プリント基板および実装技術開発動向	120
4-1	リジッドプリント基板動向と関連材料技術	120
4-1-1	有線通信市場動向	123
4-1-2	無線通信市場動向	142
4-2	フレキシブル・プリント基板動向と関連材料技術	149

4-2-1	有線通信市場動向.....	149
4-2-2	無線通信市場動向.....	152
4-3	高周波対応基板製造プロセスの変化.....	164
4-4	実装技術開発動向 .....	171
4-4-1	高密度実装の流れ.....	172
4-4-2	TSMC 3次元実装プロセスから見える高密度実装動向.....	176
4-4-3	RDL 低誘電化.....	185
4-5	まとめ .....	191
第5章	光実装開発動向 .....	193
5-1	光実装を巡る動き (COBO、CPO、IOWN) .....	193
5-1-1	通信における電気と光の境界.....	193
5-1-2	COBO (Consortium for On-Board Optics) .....	197
5-1-3	CPO (Co-Packaged Optics) .....	199
5-1-4	IOWN (Innovative Optical and Wireless Network) .....	205
5-2	光通信波長と光源 .....	210
5-2-1	光通信波長 .....	210
5-2-2	光源 .....	212
5-3	光変調 .....	215
5-3-1	変調方式 .....	215
5-3-2	E0 ポリマー.....	218
5-3-3	多値化 (WDM、PAM4) .....	225
5-4	光ファイバー .....	228
5-4-1	ガラスファイバー.....	228
5-4-1	プラスチック光ファイバー (POF) .....	230
5-4-2	MCF (Multi core Fiber).....	235
5-5	光アンプ、光アイソレーター.....	236
5-6	光導波路 .....	238
5-7	光接続 .....	242
5-7-1	光コネクタ (Fiber to Fiber) .....	242
5-7-2	光接続 (Fiber to 導波路) .....	251
5-8	光トランシーバー .....	254
5-8-1	機能と構造 .....	254
5-8-2	AOC、DAC .....	258
5-8-3	規格化、標準化 .....	259
5-9	シリコンフォトニクス .....	261
5-10	CPO 構造.....	265

5-1-1	期待される材料	270
5-1-1-1	光部品筐体	270
5-1-1-2	クラッド材料	274
5-1-2	まとめ	277
第6章	注目要素技術材料、プロセス開発動向	278
6-1	EMC・ノイズ対策	278
6-1-1	電磁波吸収による対策展開	280
6-1-2	電磁波遮へい（シールド）による対策展開	286
6-2	熱対策	288
6-3	EMC・ノイズ/放熱共用対策	294
第7章	高速・大容量伝送市場規模	298
7-1	基地局、サーバー関連	298
7-2	実装基板関連	299
7-2-1	リジッドプリント配線板（除くサブストレート基板）	299
7-2-2	サブストレート基板	300
7-2-3	フレキシブル基板	301
7-2-4	銅張積層板(CCL)	302
7-2-5	フレキシブル銅張積層板(FCCL)	303
7-2-6	ビルドアップフィルム	304
7-2-7	再配線材料(RDL)	305
7-2-8	リジッド基板用樹脂	306
7-2-9	フレキシブル基板用フィルム	307
7-2-10	ガラスクロス	308
7-2-11	まとめ	309
第8章	総括	310

一方、光は通信の動脈となっている。大陸間をはじめ基地局間、データセンター内にも使用されている。その理由は他の通信手法より圧倒的に損失が少ない点である。

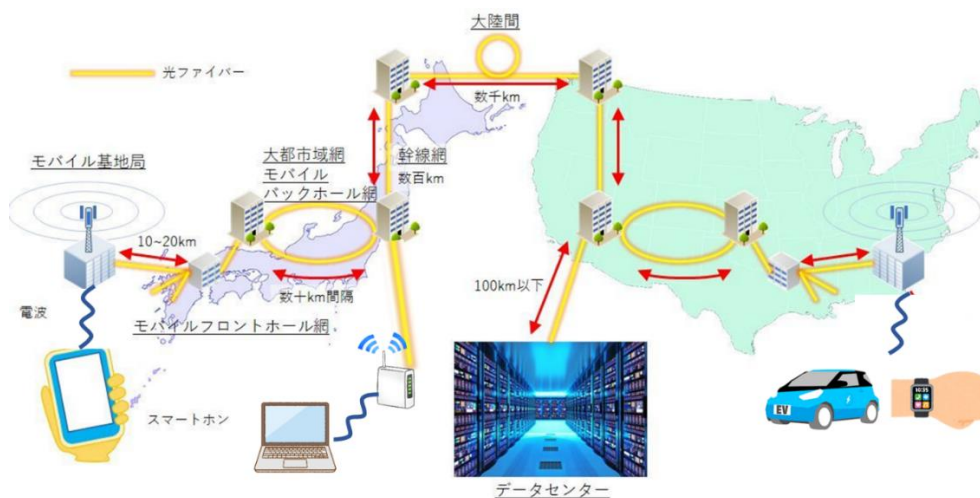


図 1-2-2 通信網イメージ

(<https://eetimes.jp/ee/articles/1807/11/news016.html> に加筆)

光ファイバーの例であるが、例えば 1550nm の場合、損失は 0.2dB/km である。km あたりの出力が入力 1 に対して 0.955 となり、4.5%が損失したこととなる。

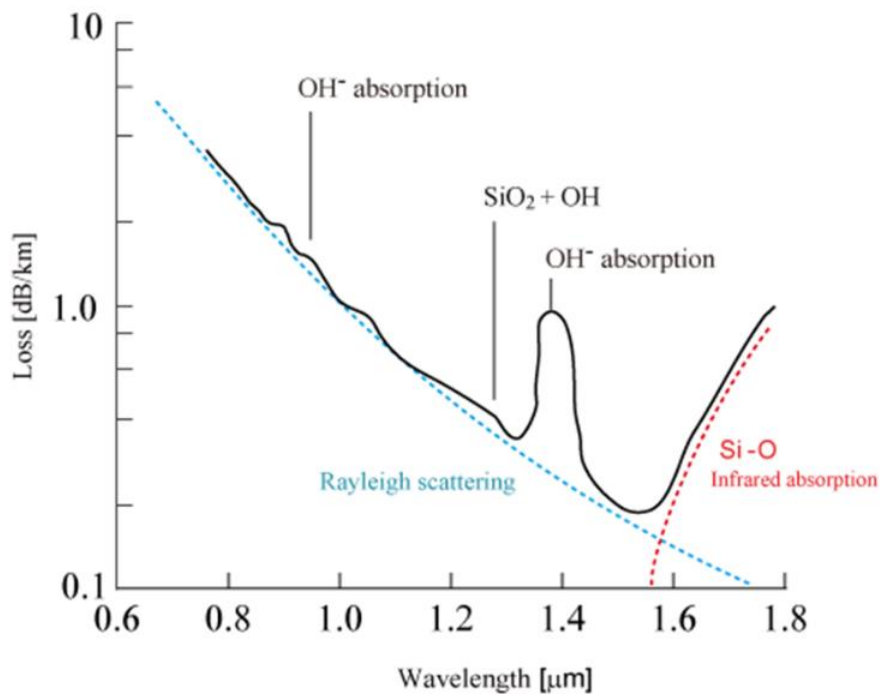


図 1-2-4 光ファイバー損失特性

(<https://optipedia.info/laser/fiberlaser/loss-1/>)

以上示したように、光は損失に関して最も小さいが有線である。電波は自由空間伝搬を考慮すると損失は大きいものの、無線ゆえ今後の IoT 展開に欠かすことはできない。一方、電気は損失が大きいことがわかる。

しかしながら、通信の信号は半導体つまり電気により制御されている。したがって、電気通信をなくすことはできない。

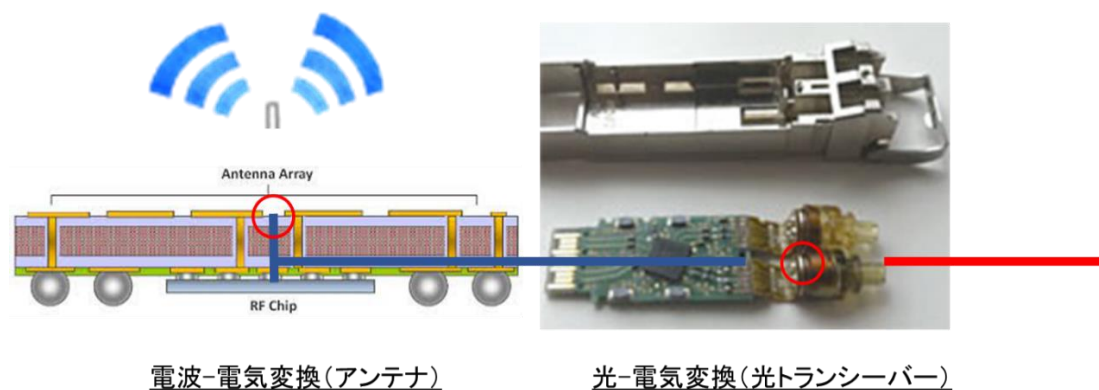


図 1-2-14 電波-電気変換、光-電気変換のイメージ(ASE 資料等に追記)

以上のことから、変換箇所の電気配線長を短くする取り組みが行われている。以下その例を示す。LTE はアクティブアンテナにしているが、無線信号を扱う RRH(Remote Radio Head) 部をアンテナ近傍に持つことで、RF (高周波) ケーブルから光ファイバーケーブルになり、電気伝送距離を短くしている。

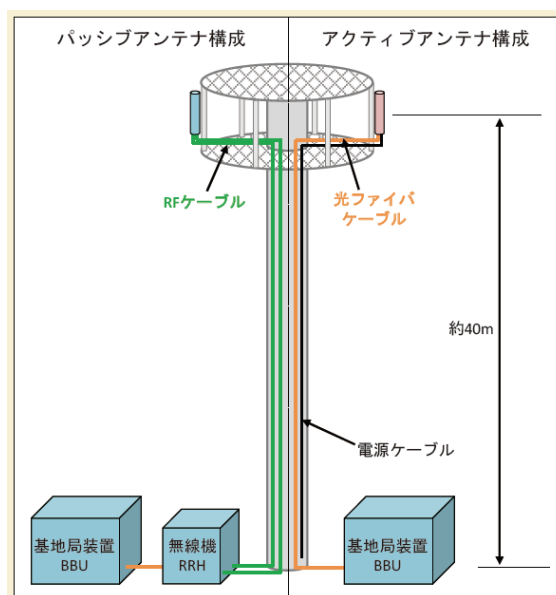


図 1-2-15 LTE アンテナの構成  
(NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル Vol. 22 No. 4)

## 1-4 今回の調査内容

第2章以降に今回の調査内容を記載するが、調査のポイントと主旨を記載しておく。

### 第2章 第5世代移動通信(5G)市場動向

商用化が始まった5Gの普及状況および本格普及に向けた5G関連部品、材料の最新開発動向について記載する

### 第3章 Beyond 5Gに向けた開発動向

Beyond 5Gの規格制定状況およびメタマテリアルなど検討されている新規技術について記載する

### 第4章 高周波対応低誘電材料、実装技術開発動向

低誘電材料の開発状況および伝送距離短縮のための実装技術、材料、また実装材料の低誘電化なども記載する

### 第5章 光実装開発動向

CP0、シリコンフォトニクスの開発動向及び光部品の役割、材料へのニーズについて記載する。

### 第6章 注目要素技術材料、プロセス開発動向

熱対策、EMCノイズ対策の最新動向について記載する

### 第7章 高速・大容量伝送市場規模

### 第8章 まとめ

表 1-4-1 今回の調査ポイント

部品、項目	KTR注目点（調査ポイント）
5G活用	遠隔医療、自動運転などへの展開状況、(材料)課題
IoT	センシング技術、電力供給問題の有無及びその対策
基板以外での樹脂活用	基地局（(ガラス)アンテナ、RFフィルタetc）、モバイル機器筐体、データセンター
6G規格制定動向	3GPP、GAFAM動向
通信システム	短距離無線改善技術、低損失、低遅延対策 (メタマテリアル、NTN (HAPS)、ミリ波RoF、仮想化、OPEN化、MEC)
テラヘルツ	対応材料および実装技術の開発状況
メタマテリアル	用途、製造(材料)課題
基板	リジッド基板(CCL)、フレキ基板(FCCL)情報更新、ビルドアップフィルム、ボンディングシートへの展開
実装技術	AiP、FOWLP、SoICなどの開発状況、再配線材料などへの低誘電材適用状況
光通信	光実装(Co Packaged Optics)開発状況、IOWNを巡る動き、E0ポリマー、Siフォトニクス
EMCノイズ、熱対策	テラヘルツ、小パッケージ化対応

## 2-3 5G 関連部品展開状況

### 2-3-1 基地局レドーム

2019年の3月下旬にSub6帯の5Gが開始されてから、現在はSub6帯通信のsmallエリアの拡張だけでなく、28GHz帯通信のsmallエリアが少しずつ増えてきている。これらのsmallエリアでは図2-3-1に示す様な基地局装置の無線子局が設置されている。この子局のハウジングにはポリカーボネート（PC）が使用されている。



図 2-3-1 5G 基地局装置の無線子局

([https://jpn.nec.com/press/201907/20190730\\_04.html](https://jpn.nec.com/press/201907/20190730_04.html))

PCが無線子局のハウジングに使われる理由は屋外で使用するための耐久性を重視しているためと推察している。電波の透過性の観点からは、PCの比誘電率が約3.0であり、Sub6帯通信には支障にならないが、28GHz帯通信では電波ビームを用いた通信のため、電波の透過特性が良い方が通信環境の整備に都合が良い。

電波の透過特性改善には低誘電率・低誘電正接の材料を選ぶ方向になる。PCより低誘電率で低誘電正接の材料となるとフッ素系樹脂、ポリオレフィン系樹脂、PS系樹脂、PPE系樹脂が挙げられるが、屋外の耐久性や難燃性、更に価格を考慮するとPPE系樹脂が有力候補になる。3-4年前から旭化成がPPEの発泡体を発表しており、その中の目的用途に5G基地局用ハウジングのアンテナカバー即ちレドームを挙げている。このPPE発泡ビーズの商品名は「サンフォース」であり、採用になった例は確認できていないが、興味ある電波透過特性を持つ部材なので、以下に「サンフォース」の特徴を紹介する。

図2-3-2に「サンフォース」（PPE発泡ビーズ）の形状を示す。細かい独立気泡からなるPPEの発泡体であり、空気が入ることにより、未発泡のPPEより低誘電率と低誘電正接になることが容易に推測される。



## 東レ 透明アンテナ用基材フィルム

東レは2021年11月にPPS (Polyphenylene Sulfide) フィルムを透明化したと発表した。PPSは5G対応スマホの内蔵アンテナの基材やフレキシブル回路基板に使われているLCP (Liquid Crystal Polymer) と同程度の誘電特性がある。このPPSフィルムをSub6やミリ波用アンテナ用途の展開を見込んでいる。このPPSフィルム上に透明なアンテナ配線を形成すれば、外観を損ねない透明アンテナができる。室内と車内にこの透明フィルムアンテナを設置する構想を図2-3-11に示す。更に、障害物の陰になって電波が届きにくい場所の5Gエリア化につなげることも期待される。



図 2-3-11 東レの高透明 PPS フィルムアンテナをバスや室内に設置する構想  
(<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/news/18/11686/>)

東レによると、「PPSは、ベンゼン環と硫黄(S)原子から成る合成樹脂。従来のPPSフィルムは黄色く透明度が低い。これはフィルム内部にある大きさ数100nmのボイド(孔)が光を散乱するためだ。このボイドは、縦方向と横方向にフィルムを伸ばす「2軸延伸」という製造工程で、フィルムを構成するPPS粒子と、PPS粒子同士の摩擦を軽減するための添加剤「滑剤粒子」とが引き離されることで発生する。」と説明している。そこで、東レは、PPS粒子と滑剤粒子の両方を新規開発し、PET並みの透明度を達成した。このPPSフィルムの透明化技術をイメージ図で図2-3-12に示す。又、東レのこの高透明PPSフィ

一方、アップルは iPhone12 以降アメリカモデルのみミリ波対応で、ミリ波アンテナは 3 か所ある。下記②、③はそれぞれディスプレイの前面、背面側を電波透過しているものと予測されるが、①はフレーム部金属に樹脂を埋め込み電波の窓としている。

- ①側面部は金属フレーム開口部
- ②基板実装部は背面側から電波を透過
- ③FaceID部はディスプレイ側から電波を透過
- ⇒低誘電ガラス、樹脂が必要？

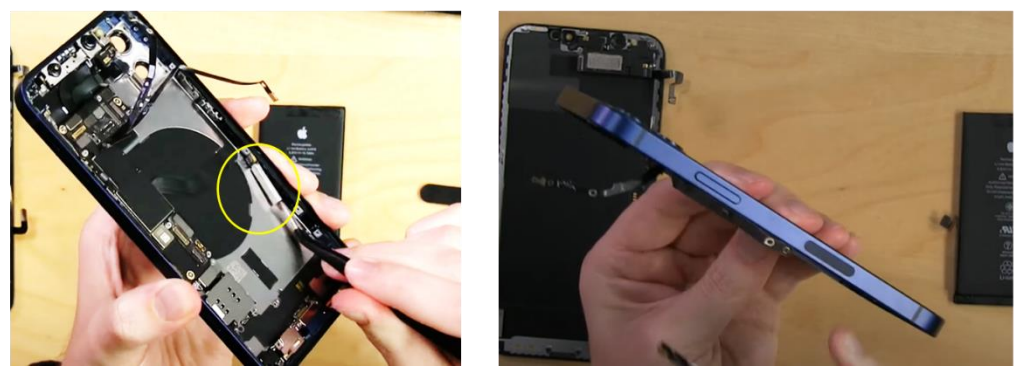
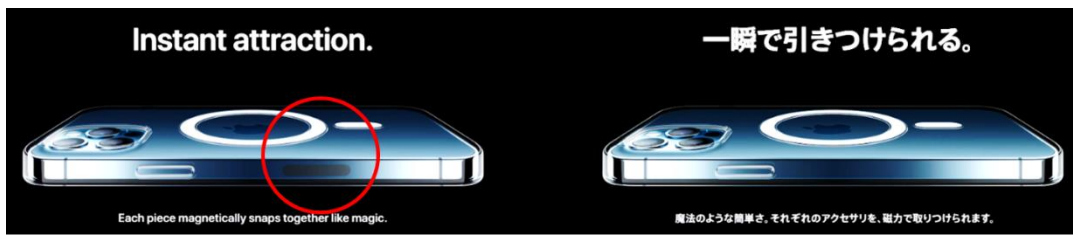


図 2-3-27 iPhone12 のミリ波アンテナ部 (iFixit 等に追記)

### 3-2-2 情報伝送システムの変化

次に、Beyond 5G による無線システムの変化について言及する。

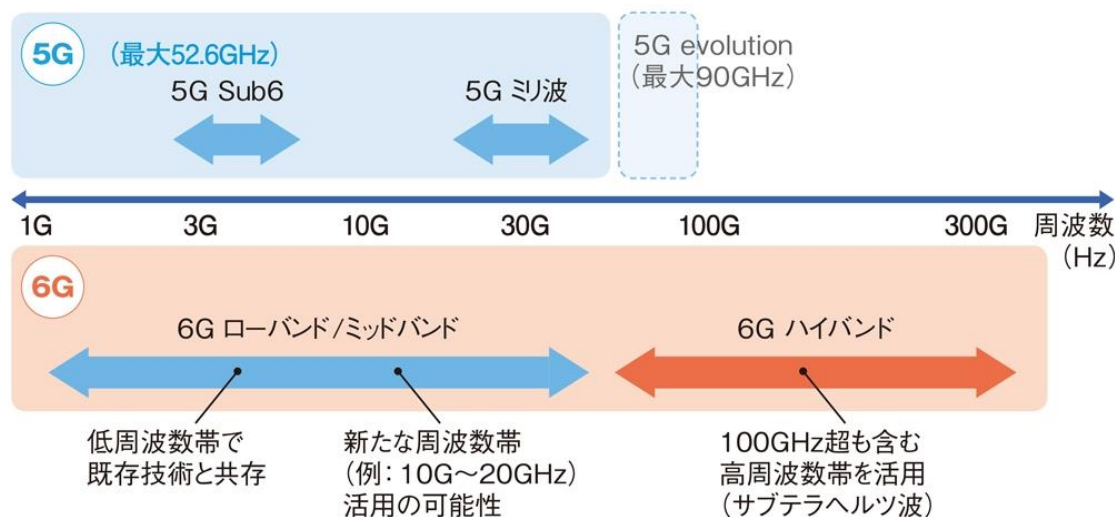


図 3-2-7 Beyond 5G(6G)における新しい周波数と電波の使い方  
(<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/mag/nnw/18/082000116/082300005/>)

超大容量高速通信が必要になる Beyond 5G においては、前述のサブテラヘルツ帯域の広帯域（ハイバンド）とそれとは別にローバンド/ミッドバンドと言われる数十 GHz 以下で使用可能な帯域を有効に使っていきとされている。Beyond 5G のさまざまなユースケースに対応させて有効な仕様が今後策定されていくと考えられる。

前述の通り、サブテラヘルツ波を使う Beyond 5G においては、5G より更に電波を遠距離まで伝送することが原理的に難しくなる。したがって、低損失で遠距離伝送が可能な光ファイバーとの組み合わせを効率よく使用していくことが想定されている。しかし、この新しい周波数帯域については、まだまだ研究開発途上の技術が多い。したがって、これからはサブテラヘルツ帯を使いこなす通信の基礎技術の確立が必要である。これについては材料評価方法を次節で述べる。その一方で、今後は光/サブテラヘルツ波を効率よく伝送する技術が必須であることは間違いない。

以下に、現在想定されている Beyond 5G 関連の各種伝送技術を紹介する。

### 3-4-4 Beyond 5G に向けたメタマテリアルのテラヘルツ領域への応用

前項で、メタマテリアルを用いた反射・透過デバイスによる 5G の特に 28GHz 帯の通信環境整備を紹介した。このような反射・透過デバイスは Beyond 5G のテラヘルツ領域にも適用出来ると考えられる。一方、メタマテリアルは反射・透過デバイスだけでなく他のデバイスにも期待されている。ここでは、他のデバイスへの応用としてアンテナ基板への応用を取り上げる。Beyond 5G は先ず 0.1THz ~ 0.3THz 通信の立上が計画されている。そこで、メタマテリアルのアンテナ基板への応用を GHz 領域の例を若干触れた後、0.1THz ~ 0.3THz 領域の開発状況を紹介します。

#### NEC のメタマテリアル「応用」アンテナ

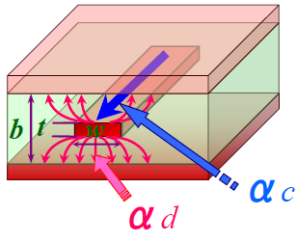


図 3-4-13 NEC のメタマテリアルを用いたアンテナの位置付け  
<https://eetimes.itmedia.co.jp/ee/articles/1204/26/news039.html>

家の中の家電や機器の消費電力をモニタリングと管理するエネルギー管理システム (HEMS) や、センサーと照明を連携させたインテリジェントな照明管理システム、更に、高齢者の見守りシステム等が無線通信で可能になる (図 3-4-13 参照)。しかし、わずかなスペースに無線通信のモジュールに入れ込むには、通信特性を保ったまま小型化を進



伝送損失 ( $\alpha$ )  $\equiv$  誘電体損失 ( $\alpha_d$ ) + 導体損失 ( $\alpha_c$ )



- $\alpha_d \propto 27.3 \times \frac{f}{c} \times \sqrt{Dk} \times Df$
- $\alpha_c \propto R_s(f, \rho, \dots) \times \sqrt{Dk} \times (t, w, b, \dots)$

$Dk$  : 比誘電率,  $Df$  : 誘電正接  
 $f$  : 周波数,  $c$  : 光速  
 $R_s$  : 導体の表皮抵抗  
 $\rho$  : 導体比抵抗,  $b$  : 絶縁層厚  
 $w$  : 導体幅,  $t$  : 導体厚

< 伝送損失の低減法 >

- ➡  $\alpha_d$  の低減  $\Rightarrow$  低Dk & Df樹脂技術の適用
- ➡  $\alpha_c$  の低減  $\Rightarrow$  樹脂/低粗化導体間の高接着技術の適用

図 4-1-2 伝送損失と関連する材料特性の関係

(S&T 出版主催「車載ミリ波レーダー/対応材料最前線」2017 日立化成発表資料)

基板材料として展開可能な各種樹脂の誘電特性を下図に示す。当然、高周波を用いた大容量伝送には図の左下にある低誘電率、低誘電正接の材料系が望まれるのは自明のことであり、各社それを目指して開発を進められている。

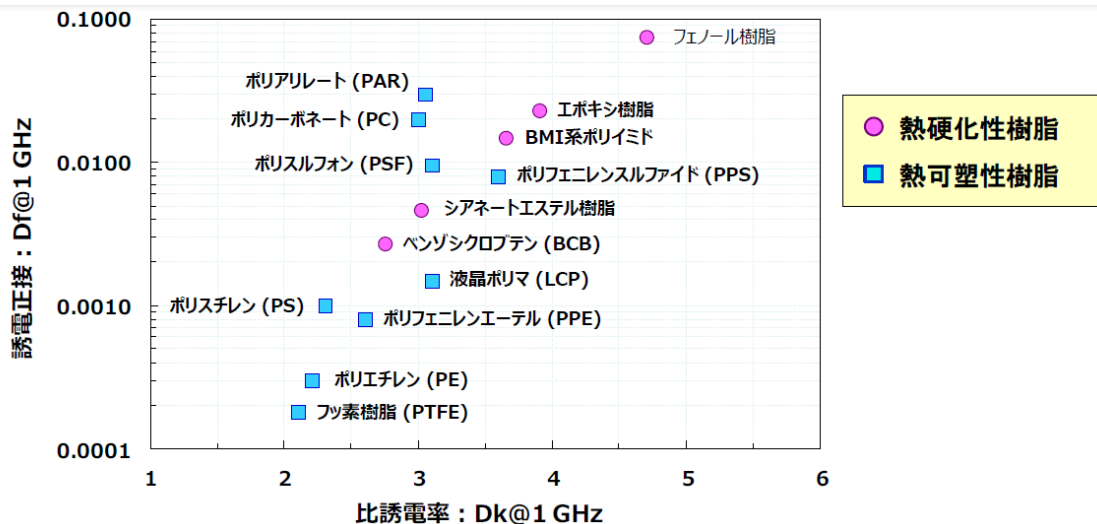


図 4-1-3 主な基板樹脂材料の誘電特性比較

(S&T 出版主催「車載ミリ波レーダー/対応材料最前線」2017 日立化成発表資料)

この市場に新規参入するメーカーも複数出てきている。例えば、太陽ホールディングスは、PPE系の材料でビルドアップフィルム市場を狙っている様である。

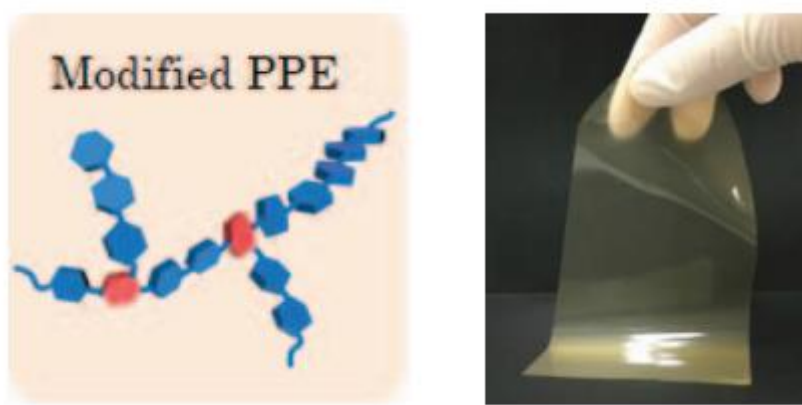
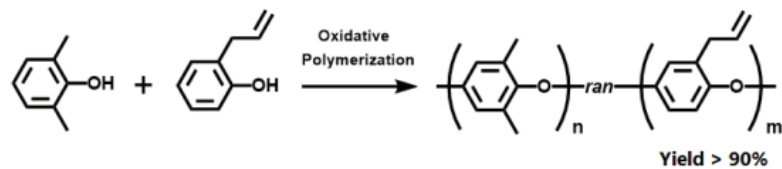


図 4-1-9 太陽ホールディングスが開発中の低損失ビルドアップフィルム材料  
(2021 IEEE 71st Electronic Components and Technology Conference (ECTC))

更には、三菱ケミカルも構造の特定はできていないが、低誘電正接品の開発を行い同市場への参入も視野に入れている様である。

熱硬化性低誘電フィルム

**【特徴】**

- 業界トップレベルの誘電正接
- 開発アイテム
- LDMS-01**：誘電特性と耐熱性の両立
- LDMS-02**：銅密着性と耐熱性のバランス
- 想定用途：  
ボンディングフィルム、ビルドアップフィルムなど

ボンディングフィルム


↑ Cu 箔

item		LDMS-01	LDMS-02
<b>Transmittance</b>	%@100μmt	-	-
<b>Dielectric constant</b>	10GHz	2.7	2.6
	28GHz	2.7	2.6
	40GHz	2.7	2.6
<b>Loss factor (tan δ)</b>	10GHz	0.0010	0.0007
	28GHz	0.0010	0.0008
	40GHz	0.0011	0.0008
<b>Water adsorption</b>	%	-	-
<b>Coefficient of thermal expansion</b>	ppm/K (MD/TD)	120	110
<b>Cu Peel strength</b>	N/cm	9	10
<b>Tg/Tm</b>	℃	-48/-	-45/-
<b>Tensile modulus</b>	GPa	0.5	0.04
<b>Chemical resistance</b>	10%-HCl (60℃)	No change	No change
	3%-NaOH (60℃)	No change	No change

図 4-1-10 三菱ケミカルの低誘電フィルム開発品  
(ネプコンジャパン 2022/1 発表資料)

データセンターや基地局系のマザー（メイン）ボード基板には、パナソニック MEGTRON シリーズが既に大きなプレゼンスを有している。

低誘電正接化をターゲットにした開発はこの領域では非常に進んでおり、現時点で既に  $D_f = 0.0015$  (@10 GHz) レベルの開発品（詳細は後述）が、サンプル評価のレベルに達している。この領域の要求ニーズの高さが伺える。



Line-up  
for  
Network

## Multi-layer circuit board materials for ICT infrastructure equipment

### ICTインフラ機器向け多層基板材料

\*ICT---Information and Communication Technology

**Applications 用途**  
Server, Router, Switch, Supercomputer, Measuring instrument, Etc.  
サーバ、ルータ、スイッチ、スーパーコンピュータ、半導体検査装置など

■ General properties 一般特性

Item	Test method	Unit	MEGTRON7	MEGTRON6		MEGTRON4	MEGTRON4S	MEGTRONM	MEGTRON2	HIPER V	
			R-5785(N)	R-5775(N)	R-5775	R-5725	R-5725S	R-5735	R-1577	R-1755V	
Glass transition temp.(Tg)	DSC	°C	200	185	185	176	200	195	170	173	
CTE z-axis	IPC-TM-650 2.4.24	ppm/°C	$\alpha 1$	42	45	45	35	32	31	34	44
			$\alpha 2$	280	260	260	265	250	240	200	255
T288(with copper)	IPC-TM-650 2.4.24.1	min	>120	>120	>120	30	50	35	25	20	
Dielectric constant(Dk) <sup>*1</sup>	1GHz IPC-TM-650 2.5.5.9	-	3.4	3.4	3.7	3.8	3.8	3.9	4.1	4.4	
Dissipation factor(Df) <sup>*1</sup>			0.001	0.002	0.002	0.005	0.005	0.005	0.010	0.016	
Peel strength <sup>*2</sup>	1oz(35μm) IPC-TM-650 2.4.8	kN/m	0.8	0.8	0.8	1.1	1.3	1.2	1.3	1.5	

The sample thickness of MEGTRON7, MEGTRON6 is 0.75mm. The sample thickness of other part number is 0.8mm.  
 <Condition> As received. \*1 C-24/23/50  
 \*2 MEGTRON7, MEGTRON6 is H-VLP copper. MEGTRON4, MEGTRON4S, MEGTRON M is RT copper. MEGTRON2, HIPER V is ST copper.

図 4-1-12 パナソニックの ICT インフラ向け既存ラインアップ

([https://industrial.panasonic.com/content/data/EM/PDF/emscatalog\\_megtron.pdf](https://industrial.panasonic.com/content/data/EM/PDF/emscatalog_megtron.pdf))

MEGTRON シリーズは、過去の上市品；MEGTRON2 から直近の MEGTRON7 まで、関連のさまざまなデバイス用基板で使用されている。

例えば、比較的スペックの緩い sub6 向けのアンテナ基板には、MEGTRON2 あるいは MEGTRON4 が投入されており、ミリ波帯 (@28 GHz) のアンテナもしくは BBU には、MEGTRON6 あるいは MEGTRON7 が投入されている。また、誘電特性と耐熱要求の高いハイスペックのスイッチ/ルーター系には MEGTRON7 となっている。

Beyond 5G を見据えたアンテナ関連の研究開発事例をいくつか紹介する。

Si-CMOS 回路技術を用いた 300 GHz 帯域の無線通信実験が行われている。パッチアンテナ基板として LCP を選択して検討した結果、60GHz を超える帯域幅でシミュレーションを反映したアンテナ利得を得られている様である。

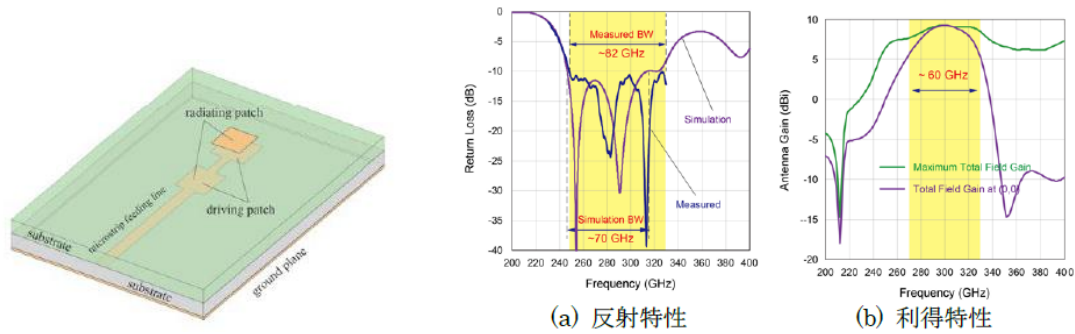


図 4-1-27 CMOS プロセス利用テラヘルツ帯(300GHz)試作アンテナの構造と反射/利得特性  
 (「電波資源拡大のための研究開発」2019)

富士通のグループでは、FOWLP (Fan Out Wafer Level Package)を応用したテラヘルツ対応(300 GHz 帯)アンテナ一体型モジュール技術を展開している。アンテナ基板材料に PPE を適用して、相応の動作特性が得られている。

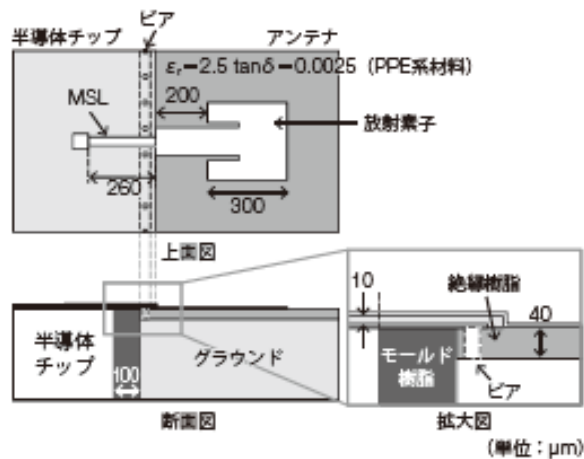


図 4-1-28 FOWLP 構造のチップ/アンテナ一体型テラヘルツ帯(300GHz)モジュールの構造  
 (富士通技報、vol. 68(1), 2017)



FPC ではボンディングシートなどの接着剤が使用される場合があります、ここにも低誘電化の動きがある。

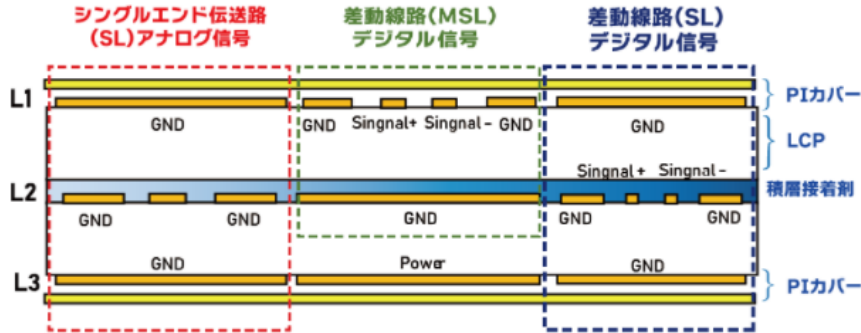


図 4-3-6 FPC での低誘電接着剤使用例

([https://www.mektron.co.jp/product/kosokudenso\\_fpc/](https://www.mektron.co.jp/product/kosokudenso_fpc/))

また、リジッドでも高周波対応 CCL は一般に価格が高くなるため、各基板メーカーは回路設計の工夫で、従来の FR4 と低誘電材料をハイブリッドする検討例が増えている。ここが基板メーカーの差別化ポイントにもなっている。低誘電接着剤が必要な場合もある。



### 高周波ハイブリッド基板

高周波ハイブリッド基板は高周波回路と制御回路を一体化したユニットにすることで、薄型・小型化を提案します。また、様々な高周波材料（PTFE・LCP・PPE・Low-k Epoxy）は一般的な基板材料と比較して高価ですが、メイコーは高周波材料と一般材料（FR-4）を独自の技術により積層・非貫通穴構造をつくることでハイブリッド構造の基板を開発しました。  
この高周波ハイブリッド基板は高周波対応基板の低コスト化および多層化対応、配線の自由度を向上させます。

### 構造例

### 構造 Structure

- 異種材との複合構造にも対応

LowDk・Df 基材  
LowDk・Df material

### ● Hybrid PWB

LowDk・Df 基材  
LowDk・Df material

一般 FR-4 基材  
FR-4 general material

図 4-3-7 高周波ハイブリッド基板の例

(<https://www.meiko-elec.com/product/detail/009.html>,  
[https://www.cmkk-corp.com/product/img/03\\_pdf\\_wb\\_201906.pdf](https://www.cmkk-corp.com/product/img/03_pdf_wb_201906.pdf))

#### 4-4-1 高密度実装の流れ

伝送経路短縮により伝送損失は小さくなる。したがって高密度（3次元）実装は高周波対応となる、以下にその開発ポイントを記載する。

先端パッケージにはFCBGAがプリント配線板の上にサブストレート基板上に配置したICを搭載する。なお、温度サイクルにおいて発生するパッケージ反りで微小バンプの破断を緩和するためにサブストレート基板が使用される。FCBGAはパソコンのCPUに代表される。先に記載したようにプリント配線板の低誘電化は進められている。次のターゲットとしてはABFに代表されるサブストレート基板の低誘電化である。

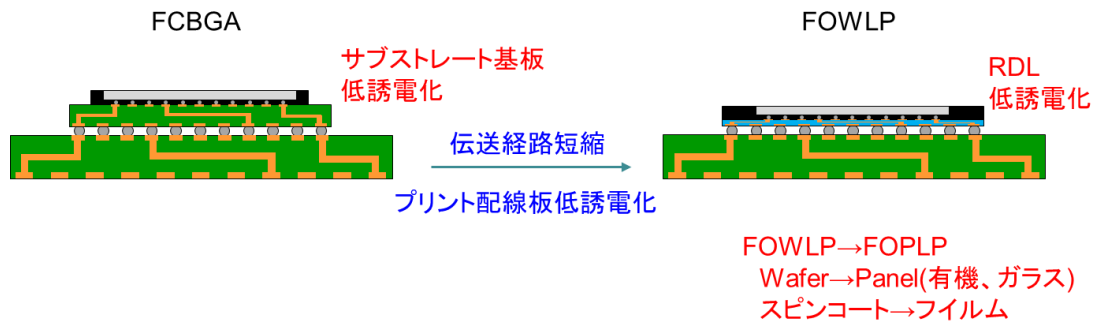


図 4-4-1 先端パッケージにおける高速通信対応

一方、スマートフォンなどではサブストレート基板の代わりに再配線（RDL：Redistribution Layer）を使用したFOWLPが広く普及してきた。スマートフォンなどでは薄型化がその動機の一つであるが、薄型化により伝送経路は短縮し伝送損失は改善する。

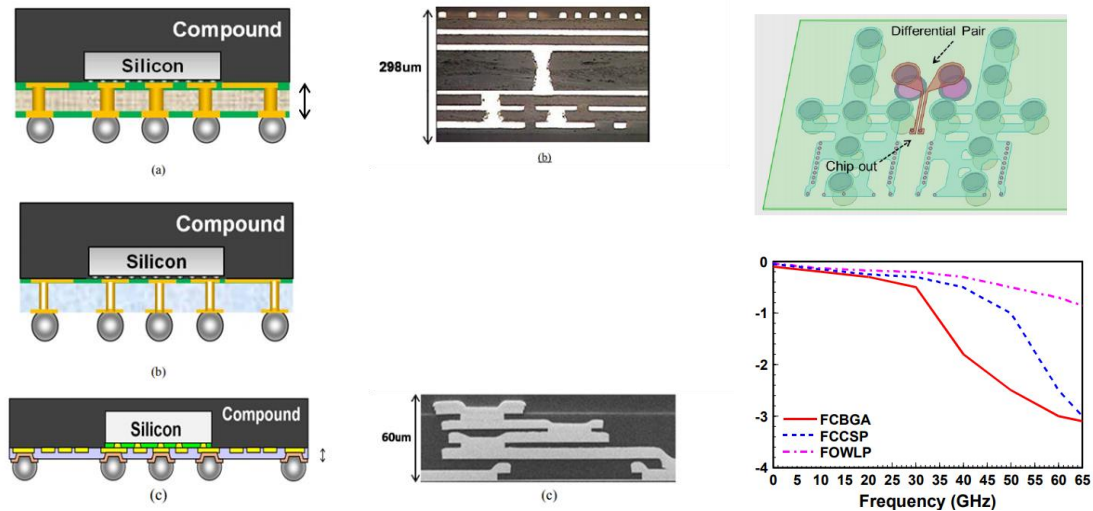


図 4-4-2 各パッケージ構造（FCBGA（上）、FCCSP（中）、FOWLP（下））における伝送損失（ECTC2019 ASE 発表資料）

以下、2019年4月の弊社セミナーではDk/Df=3.5/0.004に対して2021年5月のECTCの東レ発表資料によるとレジストタイプでDk/Df=2.7/0.007, 0.008と誘電率が大きく改善している。なお、インプリントタイプについても開発を進めている。また、FOWLP、FOPLPいずれにも対応できるように液状タイプ、シートタイプいずれも開発を進めている。

### 低誘電・低Tanδポリイミドの一般特性

		LDA-10	新規開発品	LDA-100
タイプ		コーティング剤 高伸度	コーティング剤 <b>感光性</b>	シート 低温キュア
Dk	1GHz	2.8	3.5	2.8
	20GHz	2.9	3.5	2.9
tan Df	1GHz	0.003	0.004	0.005
	20GHz	0.003	0.004	0.006
Tg (°C)		224	237	120
CTE (ppm)		46	<b>27</b>	57
強度 (MPa)		<b>136</b>	176	45
伸び (%)		<b>110</b>	58	25
吸水率 (%)		0.6	0.6	0.5
銅 密着強度 (N/mm)		6	6	<b>13</b>
硬化条件		350°C×60min	350°C×60min	<b>180°C×60min</b>

Copyright © 2019 Toray Industries, Inc. 71 TORAY

図 4-4-25 低誘電ポリイミドの特性 (KTR セミナー2019/4/25 東レ富川氏講演資料)

	PI-A	PI-B	PI-C	PI-D
Material type	Liquid	B-stage sheet	Liquid	B-stage sheet
Photo-sensitivity	Non photo.	Non photo.	Nega. type	Nega. type
Dk(20GHz)	2.7	2.6	2.7	2.7
Df(20GHz)	0.002	0.004	0.007	0.008
Tg	175°C	145°C	120°C	150°C
CTE	65 ppm	67ppm	90 ppm	75ppm
Young's Modulus	1.9 GPa	1.8GPa	2.0 GPa	1.8GPa
Tensile Strength	95 MPa	50MPa	70 MPa	70MPa
Elongation	50%	20%	50%	10%
Moisture uptake	0.6%	0.5%	0.6%	0.5%
Chemical Resistance <sup>a)</sup>	<5%	<5%	<5-10%	<5%
Cure Temp.	220°C	180°C	200°C	230°C

a) Thickness change rate after dipping in mixture of N-methylpyrrolidone and organic amine bath at 40 °C 10 min.

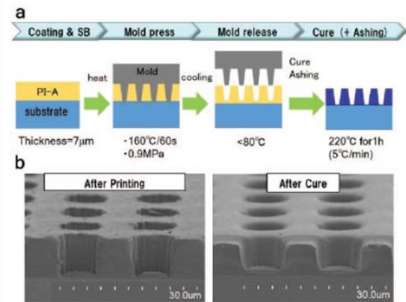


Fig. 2. (a) Process flow and conditions of imprint patterning using PI-A. (b) SEM image of 10 μm via hole of PI-A after printing and after cure.

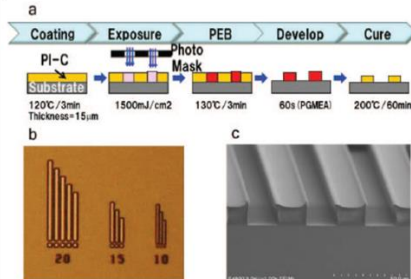


Fig. 3. (a) Process flow and conditions of photolithography process using PI-C. (b) OM image of 20-10 μm L/S pattern. (c) SEM image of 20 μm L/S and cross section view.

図 4-4-26 低誘電ポリイミドの特性 (ECTC2021 東レ資料)

表 4-5-3 高周波対応基板、実装材料開発動向

◎: 量産実績あり  
 ○, △: 開発実績あり(多, 少)  
 ×: 開発実績確認できず

KTRまとめ

用途	低誘電化動向	状況	
基板	CCL	パナソニックMEGTRON等PPEがFR4にとって代わり、拡大中	◎
	FCCL	PIからMPIの展開も進められているが、LCPが市場拡大	◎
	ビルドアップフィルム	低誘電材ニーズがあり低誘電エポキシの開発加速中	○
	ボンディングシート、接着剤	開発事例は多く今後展開が予想される	○
	カバーレイ、ソルダーレジスト	開発事例は多く今後展開が予想される	○
封止	トランスファー	現状、開発実績は多くないものの、今後実装構造の変化により必要となる可能性はある	△
	アンダーフィル	現状、開発実績は多くないものの、今後実装構造の変化により必要となる可能性はある	△
	ポッティング	主要用途がパワー半導体で高耐熱、高耐圧が開発の中心	×
FOWLP封止	WLP液状	現状、開発実績は多くないものの、今後実装構造の変化により必要となる可能性はある	△
	PLPフィルム	現状、開発実績は多くないものの、今後実装構造の変化により必要となる可能性はある	△
RDL	感光性低誘電PIなど開発が加速	○	

TSMC も COP の検討を進めている。PE (Photonic Engine) を搭載した COUPE (COmpact Universal Photonic Engine) を発表している。技術の詳細については不明だが、マイクロバンプを搭載した 3D Stack との比較をしており、前章で述べた Cu/Cu の直接接合の可能性もある。

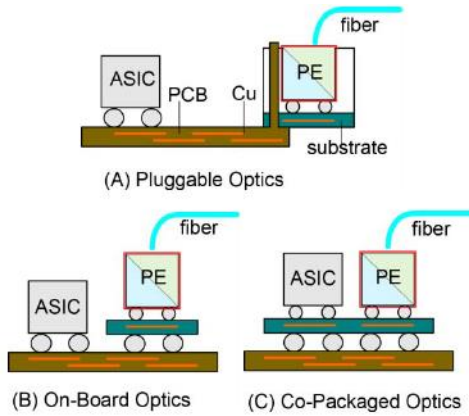


Fig. 1. SiPh package configurations on motherboard: evolved from (A) Pluggable Optics, (B) On-Board Optics (OBO), to (C) Co-Packaged Optics (CPO).

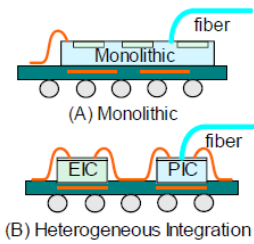


Fig. 3. PE structures of different degrees of integration: (A) monolithic, (B) heterogeneous integration.

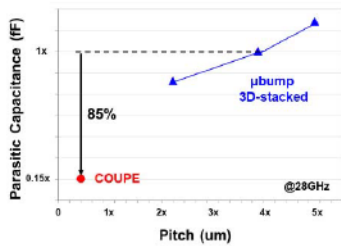


Fig. 6. EIC-to-PIC interface parasitic comparison.

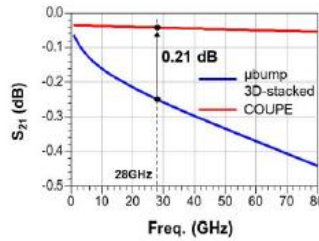


Fig. 7. Interface insertion loss and reflection loss comparison.

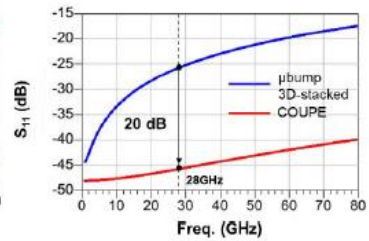


図 5-1-15 TSMC の CPO (COUPE) (ECTC2021 TSMC 発表資料)

以上、CPO の開発動向について記載したが、半導体主要メーカーが取り組んでいる。次ページ以降で技術詳細について記載するが、使用波長、インターポージャー種類、光ファイバー接続方法などがポイントとなる。

なお、半導体の CMOS プロセスをプロセスを用い PN 接合を形成し電圧によりキャリア濃度を変えることで屈折率を変化させる手法もある。

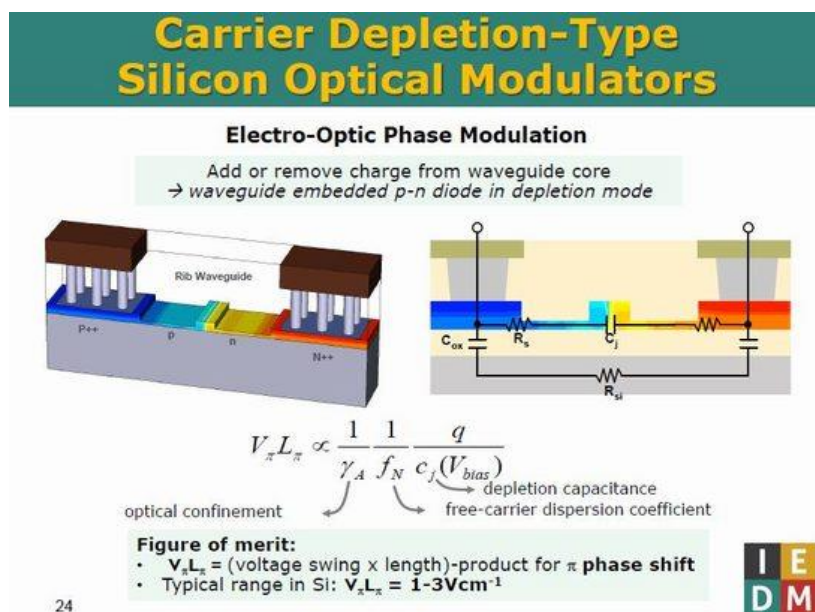


図 5-3-8 PN 接合を利用した光変調

(<https://eetimes.itmedia.co.jp/ee/articles/1806/25/news031.html>)

しかし、以下に示すように EO ポリマー/Si 導波路の方が Si よりも光変調器の性能指数である  $V_{\pi}L$  ( $V_{\pi}$ :位相を  $\pi$  変えるのに必要な電圧 (半波長電圧)、  $L$ :電極の長さ)などが優れている、関係者からも EO ポリマーに期待する声が多かった。

材料 デバイス技術	EOポリマー・ Si導波路	Si
構造		
帯域 (GHz)	> 300	37 ~ 70
$V_{\pi}L * Loss$ (dBV)	2	10
駆動電圧 (V)	< 1	1.1
消費電力 (mW/GHz)	0.03	3 ~ 6

図 5-3-9 EO ポリマーの光変調性能

([https://www2.nict.go.jp/nano/topics/NICTNEWS1601\\_yamada.pdf](https://www2.nict.go.jp/nano/topics/NICTNEWS1601_yamada.pdf))



## 5-7-2 光接続 (Fiber to 導波路)

2次元の水平方向の光配線は光導波路で可能だが、光素子の高密度実装を図るには、電気配線と同様に、3次元即ち垂直方向の光配線が必要になる。この章では、光接続として、この3次元光配線を紹介する。

光は、電気のように自在に曲げたりできないので、3次元的な光配線を実現するには、電気と比較して複雑なプロセスが必要となる。図5-7-14は、前述の図5-6-2のPETRAのピッチ変換の断面図である。図5-6-2ではシリコンフォトニクスチップとポリマー光導波路のピッチ変換が同一平面にあるように見えるが、実は図5-7-14に示すように異なる階層にある。そのため、ピッチ変換からの出力光をシリコンフォトニクスチップに導くには、2回の90度曲げが必要になる。ここでは、マイクロミラーを用いて90度曲げを実現している。なお、シリコンフォトニクスチップ側のマイクロミラーには光を集光する機能も付与するため凹面形状としている。

図5-7-15には、この3次元光配線の形成プロセスを示す。凹面形状のマイクロミラー形成には露光量を調整する“grayscale lithography(諧調露光)”を用いている。

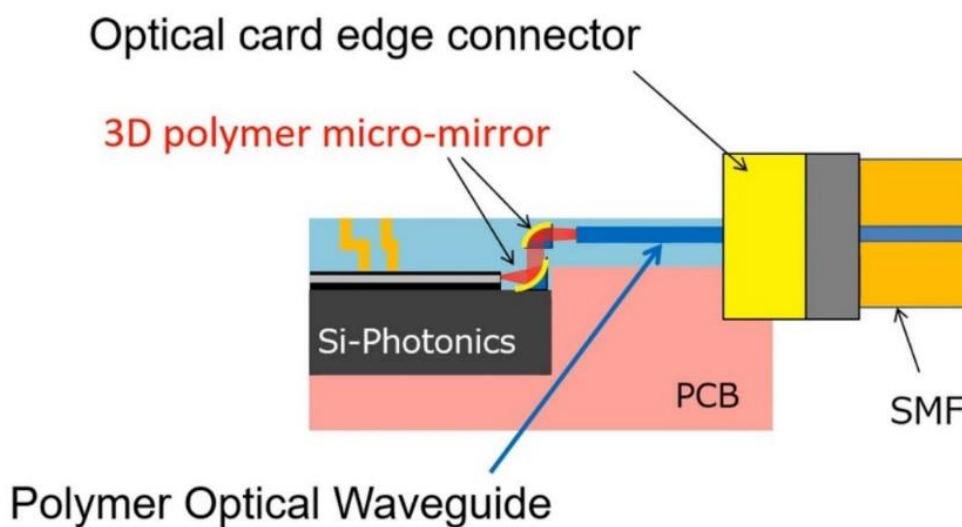


図5-7-15 マイクロミラーによる3次元光配線

(OFC2021 Th4A.1: Polymer Waveguide-coupled Co-packaged Silicon Photonics-die Embedded Package Substrate)

以下、光コネクタ部の写真で左側が QSFP タイプで 8 心、右側 SFP タイプで 2 心である。なお、左の 8 心中 4 心が点灯しているが 850nm の VCSEL が点灯しているようである。

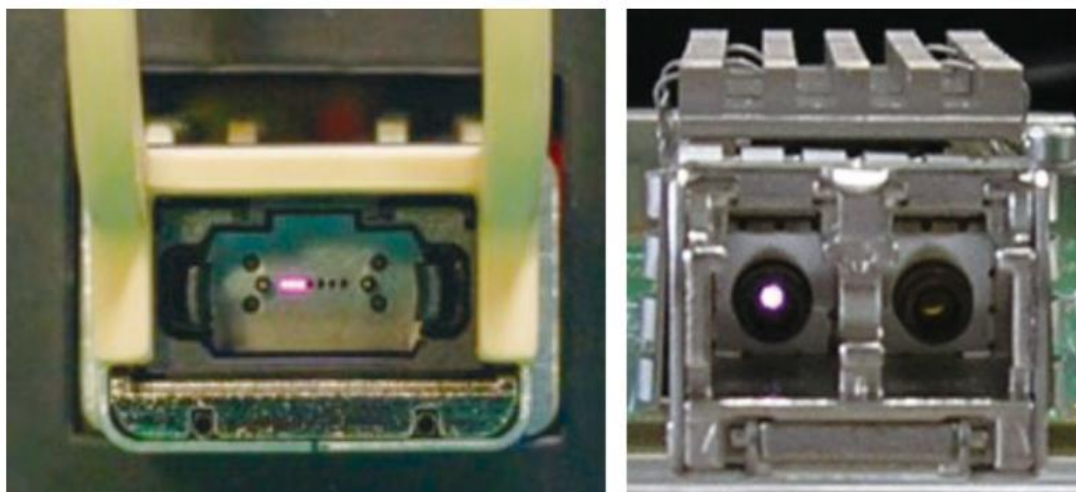
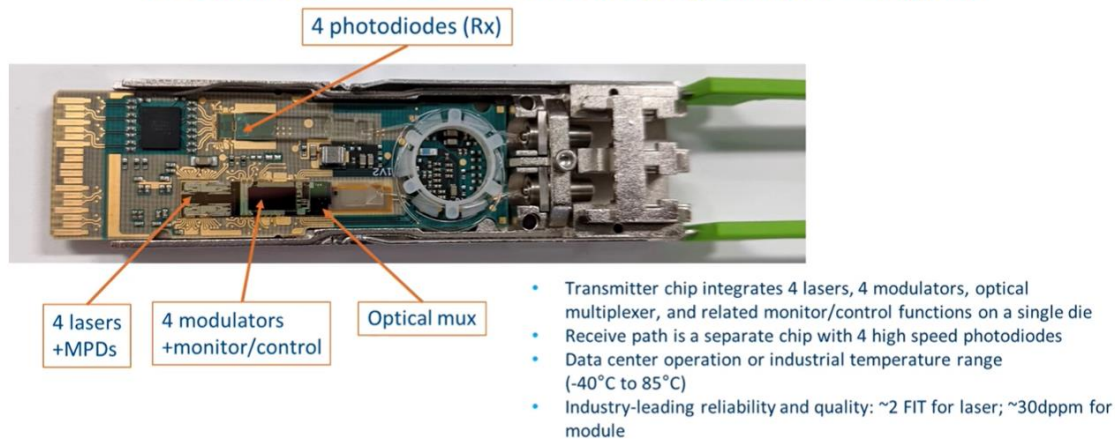


図 5-8-5 光トランシーバーにおける光コネクタ部

(<https://businessnetwork.jp/tabid/65/artid/8667/page/3/Default.aspx>)

下は、インテルのシリコンフォトニクスを用いた 100G 光トランシーバーである。画面下部が送信機側で、上部が受信機側である。

## Silicon Photonics High Volume Transceivers CWDM4 with No Hermetic Packaging, 5M units shipped



200G and 400G optics also in production and shipping in volume now

Silicon Photonics Product Division

ECOC, September 2021

intel.

図 5-8-6 光トランシーバー内部構造

(<https://www.youtube.com/watch?v=t8Gu63w8rnk&t=504s>)



また、小さくなる光電変換素子(光 IC)を同一パッケージ基板(インターポージャー)に搭載するには第 4 章で記載した高密度実装が必要となるが光路も考慮する必要がある。大手 Si ファウンダリーメーカーである Globalfoundry の資料ではインターポージャーには Si や有機基板との記載がある。

### Packaging Standardization – many variations using GF PIC technology

Company	A	B	C	D
Co-Packaging approach	2.5D - Si Interposer & cavity laminate	2.5D – organic Interposer	Fan-out package & cavity laminate	Complex dual side Organic packaging w/ cut-out
Laser source	Off module	On Module	Off Module	On Module
Fiber Attach	GF passive	GF Passive	GF Passive	GF Passive
Fiber count per PIC (SMF)	24	16	30	16
Other key PIC features supporting Co-package	Flip chip compatible, Cu u-pillars,	Laser cavity w/ multiple direct laser attach on PIC, Cu-P receive pads	Cu u-pillar receive pads, backside grind, Reflow compatible	Cu-P receive pads, Reflow compatible, 2-sided PIC FA
Packaging portable to Microelectronic OSATS?	Y	Y	Y	Y

\* From Co-Packaged Optical Module Discussion Document - Facebook 9/2019

図 5-10-3 CPO 製造実績 (Globalfoundry 資料)

以下、米国のプリント回路基板メーカーの TTM Technologies 社の開発事例だが有機の CCL 間に光導波路層を形成している。

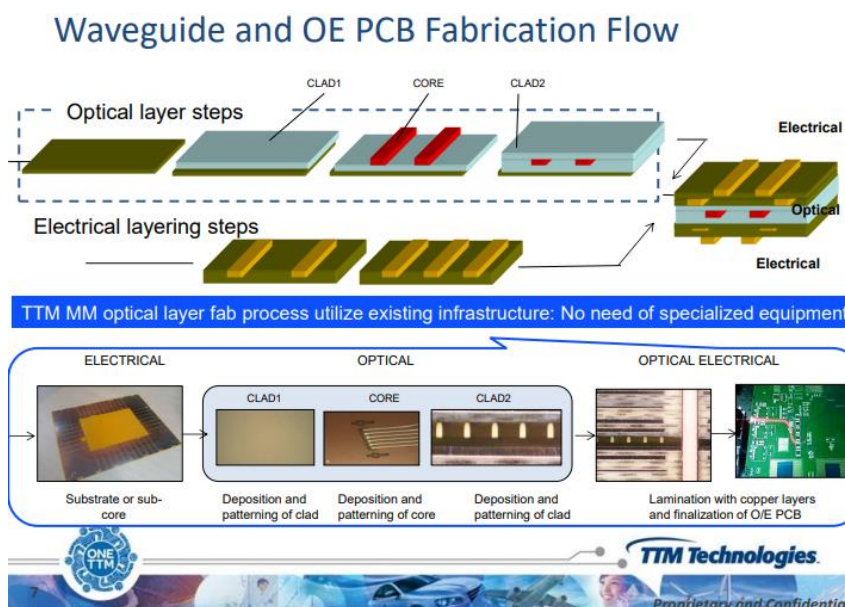


図 5-10-4 光導波路付き基板の例 (TTM Technologies)

(<https://phoxtrout.eu/wp-content/uploads/2017/01/ECOC-2016-Marika-Immonen.pdf>)

## 5-11-2 クラッド材料

デュポンはロジャース買収など通信分野での動きは活発である。以下に示すように光導波路、光接続材だけでなく放熱材料なども手掛けている。

### Photonics – Material use cases in optical transceiver

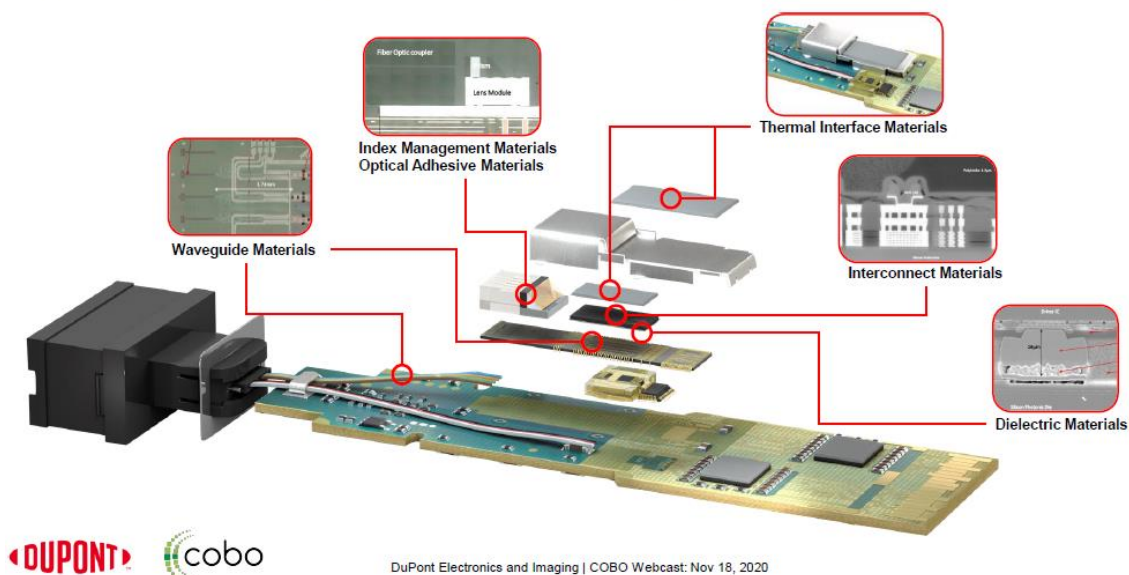


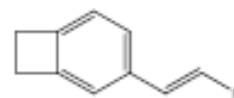
図 5-11-7 デュポン光学部品用光トランシーバー用材料（デュポン資料）

BCB(Benzocyclobutene)「CYCLOTENE」は高耐熱、低誘電材であり基板、実装材料へ検討されている。

### Core Material Competency (BCB chemistry)

Benzocyclobutene (BCB) resin shows:

- Excellent Cu barrier and electrical properties
- Good thermal stability (up to 300C) and chemical resistance
- Low T cure, no outgassing
- Multilayer build capability



CYCLOTENE™ 3000  
(Dry etch)  
CYCLOTENE™ 4000  
(photo BCB, Neg, solvent develop)  
CYCLOTENE™ 6000  
(photo BCB, pos, TMAH develop)

図 5-11-8 デュポン「CYCLOTENE」(デュポン資料)

## 5-12 まとめ

光実装開発動向について本章で記載した。以下そのポイントを整理する。  
光導波路など古くから研究が進められてきたが、いよいよ量産が近づいてきた。

表 5-12-1 光実装部品の開発動向

KTRまとめ

部品	概況、課題
光源	安価な850nm VCSELが普及したものの、今後、シリコンフォトニクスを用い1310nmの適用が展開していく
光変調器	外部変調方式でLNが使用されているが、有機色素分子を用いた1310nmEOポリマーが期待されているが、耐光性、耐熱性が課題である
光ファイバー	石英ファイバーが中心でマルチコアファイバーについても検討が進められている。POFに関しては長距離映像伝送で展開が広がっている
光アンプ	希土類元素を用いたガラスファイバーを使用
光導波路	古くから検討されているがこれから本格展開。耐熱性と製造方法(レジストタイプ)も課題
光コネクタ	通常はジルコニアフェルールを使用しているが、多心MTフェルールで樹脂コネクタのニーズがある。
光接続	光ファイバーから光導波路の接続が大きな課題。加工性の優れた樹脂材料の出番である。透明性だけでなく屈折率制御もポイント
光トランシーバー	シリコンフォトニクスを用いた光トランシーバーも登場し今後はCPOへの展開に向け小型化が課題
シリコンフォトニクス	1310nmを使用したトランシーバーがリリース済。Siを導波路として使用するため。有機材料は加工性の優れたクラッド材としての活用に機会あり。
光学筐体	Sabic ULTEMが業界で標準的に使用されている。耐熱性が課題で高耐熱EXTEMも登場している。
共通課題	高密度実装に伴う放熱対策、電磁波ノイズ対策が必要。また、低価格化のニーズも今後増えてくると予想される。

表 5-12-2 光実装に向けた樹脂材料のニーズ

KTRまとめ

対象	現状、課題
POF(プラスチック光ファイバー)	SI系POFは車載インフォテイメント系で欧州車に採用されており、今後ADAS向けへの展開が予想される。GI系POFは画像転送中心に広がりを見せる。
1310nmEOポリマー	現状のLNではこれ以上の高速変調は難しく期待が大きい。耐光性とはんだリフローに耐える耐熱性が課題
高耐熱、低CTE1310nm導波路材、接続	CPOの実用化をにらみフォトレジストタイプに期待の声有。屈折率制御と加工性が課題。また透明アンダーフィルのような実装材料の透明化のニーズもある。
シリコンフォトニクスでのクラッド材	1310nmのコアはSi。クラッド材として低屈折率が必要でデュポン「サイクロテン(BCB)」検討事例あり
高耐熱光学部品筐体	SABIC ULTEMが寡占状態。はんだリフローに耐える耐熱性が求められている。

炭素繊維が入った放熱材を基地局メーカーと評価しているとの情報や、各メーカーは液体金属をTIMに使用した結果の発表があいつぎ導電高熱伝導材料に注目が集まっている。

TABLE I. THE COMPARISON OF DIFFERENT TIMS [3-18]

Solid			TIM Type	Liquid
Epoxy base	Metal base		Material	Ga Alloy (Liquid Metal)
3.9 (Silicon base)	60 (Nano-Ag)	86 (In)	Thermal Conductivity (W/(m*K))	39 (GaInSn)
Curing	Sintering	Reflow	Solidification	Without (Liquid > 10°C)
Void, Crack, Delam.			Defect	Void
Low	High		Stress	NA
High			Thermal resistance	Normal
Deformation ←			Heat	→ Deformation
Yes ←			TIM/PKG.	→ No
Existence ←			TIM stress	→ Non-existence
Decrease ←			TIM delam.	→ No decrease
High ←			TIM coverage	→ Normal
			Thermal resistance	

Table 2. Properties of indium alloy TIMs

	Unit	100In	97In3Ag	90In10Ag
Thermal conductivity	K/mK	86	84	71
Melting point	°C	157	143 (Eutectic)	143~237
Elongation	%	22~41	50	38

図 6-2-10 TIM用液体金属(ECTC2021 SPIL(上)、AMKOR(下)発表資料)

このように絶縁が基本であった放熱材は導電でも工夫して使いこなし、高熱伝導を追い求め、液冷が必要な段階となってきた。

開発した薄型40ギガビット/秒光トランシーバ

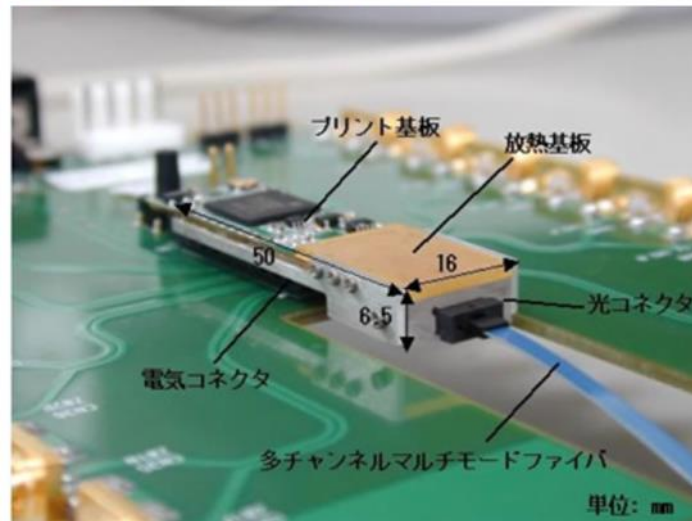


図 6-3-2 光トランシーバの構成と放熱構造

(<https://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2006/09/0921a.html>)

また、ミリ波レーダーの MMIC 周辺にも同様のハイブリッド品に対する要求があるというのを複数の関係者から聞いている。

しかしながら、実際に放熱/EMC・ノイズ対策のハイブリッドシートを開発するのは簡単ではないという事を業界関係者の声として入手している。理由としては、そもそも熱伝導性を上げる（熱抵抗を下げる）には、薄いシートが好まれる一方、ノイズ対策（電磁波吸収）にはシートが厚い方が有利であり、両者の特性を同時に良くすることは難しい。

しかし、各社これらハイブリッド対策シート展開に対しては、ユーザーからの要求も強いようで、相応のスペックのものを各社出している。また、ユーザーの要求に応じてシート（フィルム）だけでなくワニスタップのものもラインアップとして準備している様である。

確かに上記いずれの用途についても、これから市場の伸びが期待される所であり、サプライヤーの開発意欲は継続して高いと考える。

申し込み先

(有) カワサキテクノロジーリサーチ コンサルテーション・サービス事業部

FAX:06-6232-1056 Email ktr@kawasaki-tr.com

## お申込書

<マルチクライアント調査>

**「次世代高速・大容量伝送市場と対応材料技術展望 2022**

-デジタルツイン/サステナブル社会実現を目指す Beyond 5G での材料技術変化を読む-

書籍 : 500,000 円 (税別)      書籍+pdf : 550,000 円 (税別)

★KTR コンサル会員様割引 50,000 円

貴社名 \_\_\_\_\_

部署名 \_\_\_\_\_

お名前 \_\_\_\_\_

TEL \_\_\_\_\_

FAX \_\_\_\_\_

Email \_\_\_\_\_

連絡先住所 \_\_\_\_\_

なお、調査報告会 (有料) をご希望の方は、以下にご記入下さい。

調査報告会のご要望ある方      希望する      不要

※ 報告会費用

50,000 円 (約 2 時間 税別) + 交通費 (実費)