

Eat Well, Live Well.



高周波インダクタ向け 軟磁性粉末／樹脂複合シートの開発

味の素ファインテクノ株式会社
研究開発部 第1グループ
マネージャー 大山 秀樹

1. 会社紹介
2. 軟磁性粉末／樹脂複合シートの開発
3. 軟磁性粉末／樹脂複合シート開発品のご紹介

Eat Well, Live Well.



味の素グループ

Eat Well, Live Well.



味の素ファインテクノ会社紹介

Eat Well, Live Well.



商号	味の素ファインテクノ株式会社	
所在地	本社	神奈川県川崎市鈴木町
	群馬工場	群馬県昭和村
設立	1942年	
従業員数	441名(2025年8月現在)	

★North American activity
AFT-USA
@ Silicon Valley
Established in 2015

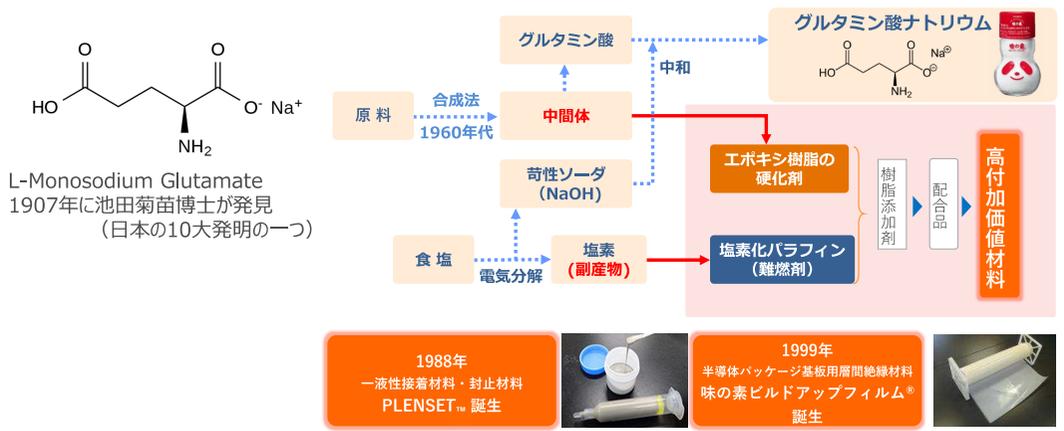
★Taiwan activity
TAISO COMMERCE INC.
@ Taiwan
Established in 1988

★China activity
Ajinomoto Shanghai Specialty
Chemicals CO., Ltd.
@ China Established in 2018



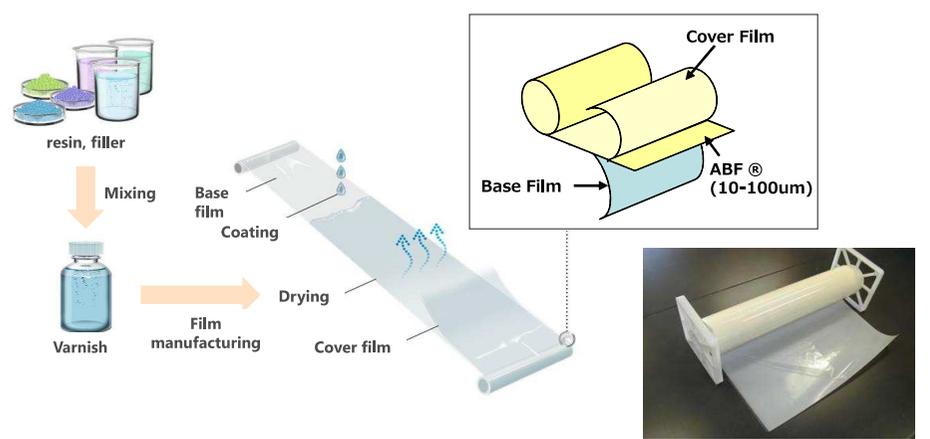
何故、味の素(株)が電子材料？

■ アミノ酸の製造工程で生じる中間体や副生成物を有効活用し、樹脂添加剤ビジネス、配合品ビジネス、電子材料ビジネスへと発展した。

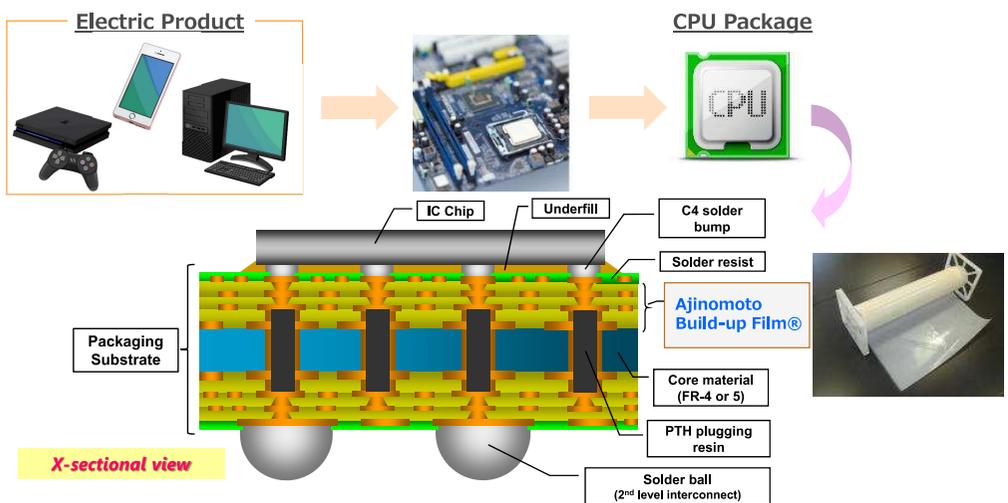


有機半導体パッケージ用層間絶縁材料 Ajinomoto Build-up Film®

■ 当社が1997年に世界で初めて開発したフィルム状のビルドアップ基板用絶縁材料



有機半導体パッケージ用層間絶縁材料 Ajinomoto Build-up Film®



味の素ファインテクノの製品ラインナップと用途

ABF® : Ajinomoto Buildup Film®
RCC : Resin Coated Copper foil



製品を支える4つのコア技術



分子設計



配合設計



プロセス開発



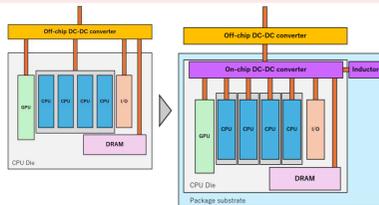
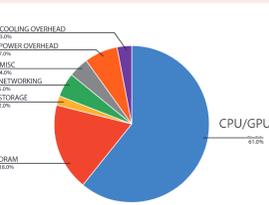
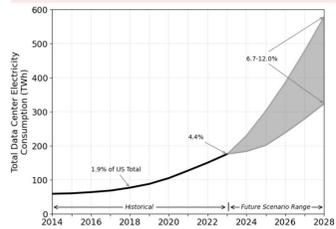
ソリューション提案



1. 会社紹介
2. 軟磁性粉末/樹脂複合シートの開発
3. 軟磁性粉末/樹脂複合シート開発品のご紹介

背景：情報化社会の電力需要増大とPOL電源の高周波化・小型化ニーズ

- データセンターの消費電力が増大し、その内訳としてCPUの消費電力が拡大。
- CPUの多コア化に伴い電源レールの増加および電源の高効率化のためPOL(Point-of-Load, 分散給電方式)電源導入が進む。
- POL電源導入のために、インダクタのパッケージ基板統合について研究がなされており、インダクタは薄型・小型化、高周波適合性などのニーズがある。

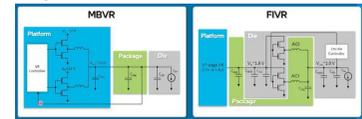


- ✓ インダクタのパッケージ基板統合を実現するため、真空ラミネート法に適合しコイル作製が可能な薄型で高周波数帯で低損失な磁性粉末/エポキシ複合磁性シートの開発が求められている。

[1] Arman Shehabeli et al., 2024 United States Data Center Energy Usage Report, Dec 19, 2024
[2] L. A. Barroso, et al., "The Datacenter as a Computer: Designing Warehouse-Scale Machines, 3rd ed.", Morgan & Claypool Publishers (2018)

先行研究事例 (パッケージ基板へのPOL電源統合の試み)

- Haswell (2014) [3], Broadwell (2015) [4] | FIVR (Fully Integrated Voltage Regulator, on-package/空芯)
 - パッケージ基板へのインダクタ配置によるPOL電源の高効率化を実証。
- Ice Lake (2020) [5] | MIA (Magnetic Inductor Array, on-package/磁芯)
 - 磁性材料によりインダクタを小型化、EMIを抑制。
- Coax MIL (2021) [6] | Co-axial Metal Inductor Loop (in-package(基板内蔵)/磁芯)
 - スルーホールへの磁性材の充填→再穴あけ・メッキによるインダクタの基板内蔵構造



	[3]	[4]	[5]	[6]
外観、 模式図等				
周波数 [MHz]	140	140	140	100

- ✓ パッケージ近傍へのインダクタ配置、POL電源方式による電力供給・高効率化を実証したが、空芯ゆえのEMI・寄生・大型化の限界が残る。
- ✓ 高周波数帯で小型・低損失を同時に満たせる磁性インダクタも実証されているが、磁性材料開発の指針が提示されていない。

[3] Burton, Edward A., et al., "FIVR—Fully integrated voltage regulators on 4th generation Intel® Core™ SoCs," 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC 2014, IEEE, 2014.
[4] Nalamalpu, Anikroday, et al., "Broadwell: A family of IA 14nm processors," 2015 Symposium on VLSI Circuits (VLSI Circuits), IEEE, 2015.
[5] Sankarabharaniam, Mahaveerayan, et al., "Magnetic inductor arrays for Intel® fully integrated voltage regulator (FIVR) on 10th generation Intel® Core™ SoCs," 2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), IEEE, 2020.
[6] Bharath, Krishna, et al., "Integrated voltage regulator efficiency improvement using coaxial magnetic composite core inductors," 2021 IEEE 71st Electronic Components and Technology Conference (ECTC), IEEE, 2021.

先行研究事例(磁性材料を用いたチップレベル統合の試み)

	[7]	[8]	[9]
外観、模式図			
特長	標準CMOSプロセスで作製、モノリシックダイへの統合が可能		
周波数	150 MHz	10 MHz	100 MHz
磁性材料	種類、形成方法 非晶コバルト系合金、スパッタ	Fe ₂₀ -Ni ₈₀ 薄膜、メッキ	Co-Zr-Ta-B薄膜、スパッタ
特性	$\mu' > 500$, $H_c < 80$ [A/m]	$\mu' > 1000$	No data
インダクタ性能	$L = 212$ [nH], $Q = 15$	$L = 15$ [nH]	$L = 8$ [nH], $R_{dc} = 60$ [mΩ]
課題	$L/R = 188$ nH/Ωと高抵抗 $I_{sat} = 0.45$ [A]	電源効率 75%	$I_{sat} = 0.6$ [A] (@100 MHz)

✓ チップレベル薄膜インダクタは高密度、小L、高周波化には強い一方、**直流重畳特性、量産プロセスがボトルネック**。
 ✓ 磁性薄膜は磁気異方性（容易軸/困難軸）を前提とするため、**インダクタ設計・レイアウトや結合最適化の自由度が低い**。
 => **磁性シートは、高L、直流重畳特性、量産性、インダクタの設計自由度が高い（球状磁性粉の場合）ため有利。**

[7] N. Sturcken et al., "Magnetic thin-film inductors for monolithic integration with CMOS," 2015 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), IEEE, 2015.
 [8] N. Sturcken et al., "A 2.5 D Integrated Voltage Regulator Using Coupled Magnetic Core Inductors on Silicon Interposer," in IEEE Journal of Solid State Circuits, vol. 48 no 1 pp 244-254 Jan 2013
 [9] P. Zou et al., "A 100 MHz VDC-MLC with On-chip Magnetic Thin Film Inductors" in 2018 International Workshop on Power Supply On-Chip © 2025 Ajinomoto Co., Inc.

先行研究との比較(磁性粉末・樹脂複合材料、バルク磁性材料)

		磁性粉末・樹脂複合材料			バルク磁性材料	
		磁性シート	磁性インク ^{[9],[10]}	圧粉磁心用粉末 ^[11]	金属ガラス ^[12]	フェライト ^[13]
イメージ図(参考)						
μ'	< 1 MHz	10~12	7~8	23.6	5,000	> 10,000
	10 MHz	10~12	7~8	23	No data(未記載)	No data(未記載)
	100 MHz	10~12	7~8	18~19	No data(未記載)	No data(未記載)
$\tan\delta$	100 MHz	<0.05	<0.05	No data(未記載)	No data(未記載)	No data(未記載)
高周波適用性 (100-150 MHzでの適用可能性)		○	○	× (推奨: < 10 MHz)	× (推奨: < 1~10 MHz)	× (推奨: < 1~10 MHz)
磁性粉末の充填率 [vol %]		70~80	70*	79~83*	-	-
材料の柔軟性		○	○	×	×	×
想定工法		真空ラミネート	印刷・塗布	プレス成型・焼鈍	溶射、薄帯	焼結
インダクタ薄型化への適用性		○	△	×	×	×

*樹脂密度1.20 g/cm³・空隙率0の仮定に基づく参考推定値。

✓ **磁性シートは、他の磁性粉末・樹脂複合材料に比べて、高周波適用性、材料柔軟性、インダクタ薄型化の観点で有利。**

[10] 杉村 隆子, 徳川大学工学部論文"MM: 薄力用鉄系メタルコンパジット中心に関する研究"(2019年3月)
 [11] Sonokawa, Hiroki, et al., "Development of magnetic molding compound for low pressure molding inductors with both good magnetic properties and high reliability," 2024 IEEE 74th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), IEEE, 2024.
 [12] 山内清隆, 古沢亮二, "アモルファスおよび多結晶合金系軟磁性材料の開発, 粉体および粉末冶金 51,3 (2004) 135-142.
 [13] 安部 亮志, et al., "高周波帯用Fe-Zn-フェライトの磁気特性," 日本粉体協会誌 19,2 (1995) 417-426.
 © 2025 Ajinomoto Co., Inc.

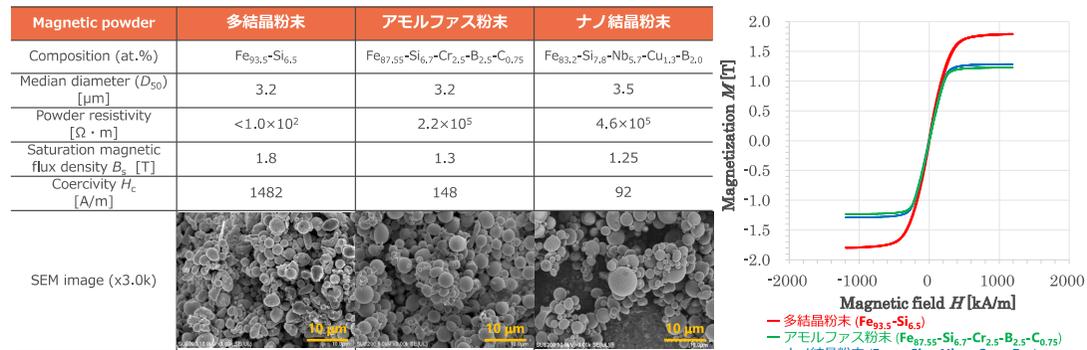
本発表での磁性シートの開発目標

- 本発表では、以下の目標を達成する100MHz帯向け磁性シートの開発について報告する。
- 同一の磁性粉末を用いて磁性シートと圧粉トイダルリングを作製、磁気特性を比較し、磁性シートの磁気特性の優位性を検証する。

	評価項目	目標
高周波適用性 (100-150 MHzでの適用可能性)	μ' @100 MHz	> 10~12
	$\tan\delta$ @100MHz	< 0.05
材料の柔軟性	シート粘度	<10 ³ Pa・s
	ラミネートによる配線基板埋め込み性	問題無き事

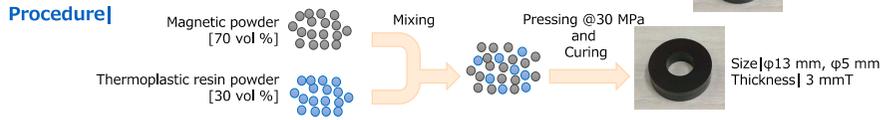
鉄系多結晶・アモルファス・ナノ結晶粉末の比較(3 μm級)

- 鉄系多結晶粉末 | 低粉体抵抗率 (<1×10² Ω・m)、高B_s (1.8 T)、高H_c (1482 A/m) ・ ・高周波帯で損失が大きい
- 鉄系アモルファス粉末 | 高粉体抵抗率 (2.2×10⁵ Ω・m)、低H_c (148 A/m) ・ ・高周波帯での損失低減に有利
- 鉄系ナノ結晶粉末 | 高粉体抵抗率 (4.6×10⁵ Ω・m)、低H_c (92 A/m) ・ ・高周波帯での損失低減に最も有利

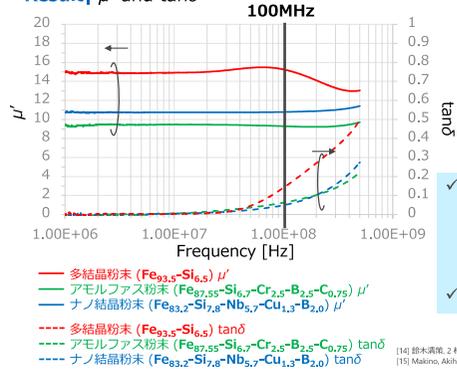


✓ ナノ結晶粉末は高い粉体抵抗率と低保磁力を示し、アモルファス粉末とともに高周波帯での損失低減に有効。

圧粉トイダルリングの作製工程および磁気特性比較



Result | μ' and $\tan\delta$



	多結晶粉末	アモルファス粉末	ナノ結晶粉末
μ' @100 MHz	15.3	9.5	10.7
$\tan\delta$ @100 MHz	0.141	0.062	0.05
Powder resistivity* [$\Omega \cdot \text{m}$]	$<1.0 \times 10^2$	2.2×10^5	4.6×10^5
Coercivity* H_c [A/m]	1482	148	92

*magnetic powder's properties

- ✓ ナノ結晶粉末を用いた圧粉トイダルリングは、 $\tan\delta$ が最小。
 - 保磁力 H_c が小さくヒステリシス損失が少ない。
 - ランダム異方性モデルに基づく1次磁気異方定数 K_1 の大幅低下^[14]
 - 磁歪 λ_s が数 ppmであり、応力で誘起する磁気異方性の抑制^[15]
 - 高電気抵抗率により渦電流損失を抑制。
- ✓ ナノ結晶粉末は最も低損失を示す有望な磁性粉末である。

^[14] 鈴木清隆, 2相ナノ結晶材料の磁気抵抗効果と保磁力, 日本応用磁気学会誌 24, 2 (2000) 495-496.

^[15] Makino, Akhiro, et al. Fe-Sb-B-Cu nanocrystalline soft magnetic alloys with high Bs of 1.9 T produced by crystallizing hetero-amorphous phase. Materials Transactions 50, 1 (2009) 204-209.

磁性シートの作製工程と溶融粘度評価



*Details are described in patent| WO2018194100 A1

DOE

Leg	1	2	3	4	5	6	7	8	9
磁性粉末	多結晶粉末			アモルファス粉末			ナノ結晶粉末		
充填率 [vol%]	70	75	80	70	75	80	70	75	80

Result

シート粘度

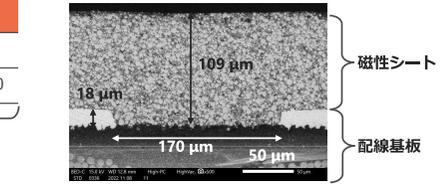
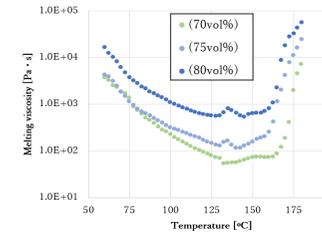


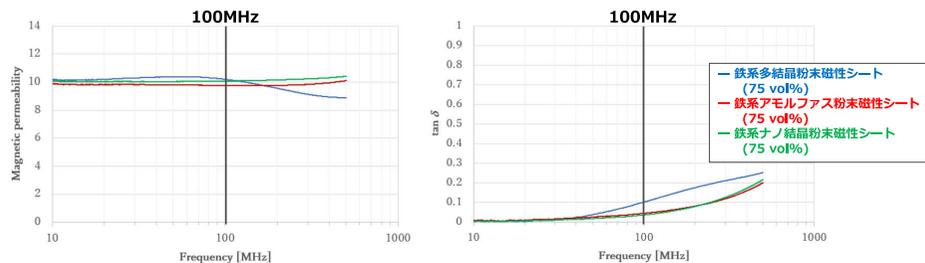
図 磁性シート(ナノ結晶粉末80vol %充填、厚み100μm)による配線基板埋め込み結果 (配線基板のL/S = 180μm / 170μm、配線高さ18μm)

- ✓ 充填率は70~80vol%の磁性シートは125~150°Cにおいて、 $10^2 \sim 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 級の粘度を示し、適度な柔軟性を有している。
- ✓ 配線基板への埋め込み性も良好。

磁性シートの磁気特性比較

Result | μ' and $\tan\delta$

Leg	1	2	3	4	5	6	7	8	9
磁性粉末	多結晶粉末			アモルファス粉末			ナノ結晶粉末		
充填率 [vol%]	70	75	80	70	75	80	70	75	80
μ' @100 MHz	9.7	10.2	10.8	9.1	9.7	10.2	9.3	10.1	10.5
$\tan\delta$ @100 MHz	0.100	0.105	0.105	0.040	0.045	0.046	0.038	0.039	0.042

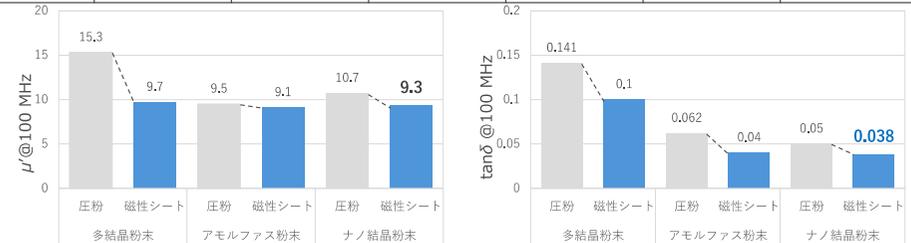


- ✓ ナノ結晶粉末を使用した磁性シートは、透磁率と損失のバランスが良好 (アモルファス粉末よりも高透磁率、低 $\tan\delta$)。

圧粉トイダルリングと磁性シートの磁気特性比較

- 多結晶粉末、アモルファス粉末、ナノ結晶粉末の圧粉トイダルリングと磁性シートの磁気特性(μ' と $\tan\delta$)を比較。(充填率は70 vol %で統一)
- 磁性シートが圧粉トイダルリングと比較して低 μ' 、低 $\tan\delta$ を示した。

磁性粉末	多結晶粉末		アモルファス粉末		ナノ結晶粉末	
	圧粉トイダルリング	磁性シート	圧粉トイダルリング	磁性シート	圧粉トイダルリング	磁性シート
μ' @100 MHz	15.3	9.7	9.5	9.1	10.7	9.3
$\tan\delta$ @100 MHz	0.141	0.100	0.062	0.040	0.05	0.038



- ✓ 圧粉トイダルリング：プレス工程のため、粒子同士の接触が多く局部的導電経路の発生により、渦電流損失増加。また、プレス時の応力により、ヒステリシス損増加。結果、 $\tan\delta$ が大きくなると考えられる。
- ✓ 磁性シート：エポキシが粒子間を絶縁し、渦電流損失を抑制。一方、樹脂相が磁気ギャップとして働き、磁路が分断されやすく、磁性シートの透磁率は相対的に低くなると考えられる。

➤ 100 MHzにおいてナノ結晶粉末磁性シートは最も有望 ($\tan\delta$ 最小かつ μ' が実用的数値)

1. 会社紹介

2. 軟磁性粉末／樹脂複合シートの開発

3. 軟磁性粉末／樹脂複合シート開発品のご紹介

Eat Well, Live Well.



© 2025 Ajinomoto Co., Inc.

21

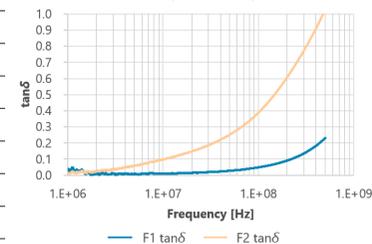
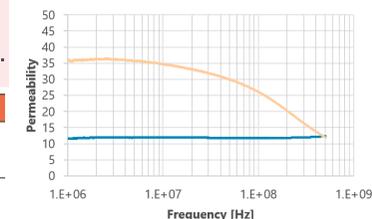
磁性シートF1, F2の硬化物性

- F1| for high frequency, good permeability and low loss tangent.
- F2| for low frequency, good permeability and large current compatible.

	F1	F2
Feature	For high frequency	For low frequency, large current capability
Recommended process	Hot press, Lamination	Hot press
Tg (DMA) [°C]	161	153
CTE (x-y, 25-150°C/150-240°C) [ppm/°C]	17 / 31	17 / 22
Mechanical properties (23 °C)	Young's modulus [GPa]	11,1
	Tensile strength [MPa]	62
	Elongation [%]	0.6
Magnetic properties	Permeability (μ')	12 @100MHz
	Loss tangent	0.05 @100MHz
Status	R&D sample	R&D sample

*Cure condition | 190°C90min

© 2025 Ajinomoto Co., Inc.



22

磁性シートF1, F2のB-Hカーブ

Material | F1, F2

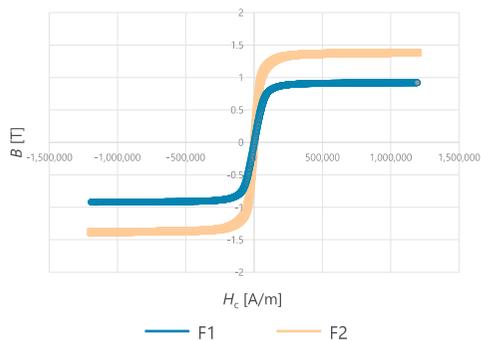
Condition |

Machine: VSM (Vibrating Sample Magnetometer)

Applied magnetic field: 15,000 Oe (=1,200 kA/m)

Measurement temperature: 23°C

Result | B-H curve



	F1	F2
Saturation magnetic flux density B_s [T]	0.92	1.38

© 2025 Ajinomoto Co., Inc.

23

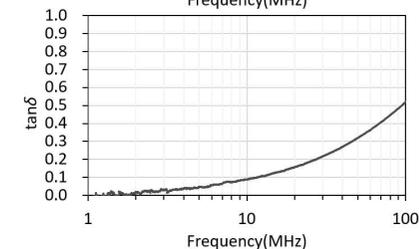
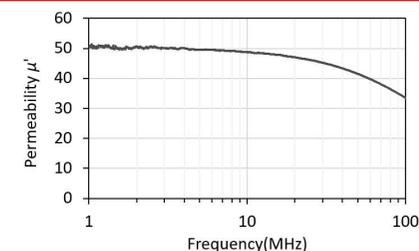
磁性シートF3の硬化物性

- F3| for low frequency, the highest permeability ($\mu' = 48.5 @10 \text{ MHz}$) in our material.

	F3	
Feature	High permeability	
Recommended process	Hot press, Lamination	
Tg (DMA) [°C]	173	
CTE (x-y, 25-150°C/150-240°C) [ppm/°C]	9 / 10	
Magnetic properties @10 MHz	Permeability (μ')	48.5
	Loss tangent	0.09
Status	R&D sample	

*Curing condition: 190°C x 90min ** Measured by Keysight 16454

© 2025 Ajinomoto Co., Inc.



24

まとめ

- インダクタのパッケージレベル統合を実現するため、薄型で高周波帯で低損失な磁性粉末・エポキシ複合シートが求められている。
- 磁性シートは高透磁率、低損失、ラミネート可能な溶融特性の実現が重要。
- 磁性シートは圧粉トロイダルリングと比較して低損失を示すことを確認した。
- 今後の技術ニーズに対応するため、10~100MHz帯において高透磁率・低損失な磁性シートを開発中。

評価項目	目標	ナノ結晶粉末(80 vol %)磁性シート
μ' @100 MHz	> 10~12	10.5
$\tan\delta$ @100MHz	< 0.05	0.042
シート粘度	$<10^3$ Pa·s	$<10^3$ Pa·s @125-150 °C
ラミネートによる配線基板埋め込み性	問題無き事	埋め込み性良好 (問題無し)

Eat Well, Live Well.

Aij
AJINOMOTO®