



技 報



K O M A K U S A ・ 2015.10・

技報「こまくさ13号」発刊に当って

一般財団法人信州大学工学部若里会 副理事長 信州大学名誉教授 小沼 義治

研究助成
報告

携帯電子機器における受信回路用高効率LNAに向けた 高Q集積化RFインダクタの開発

電気電子工学科 曾根原 誠

Na型マイカの大気中焼成による低温合成と膨潤化

物質工学科 山口 朋浩

| 研 | 究 | 室 | 紹 | 介 |

熱流体解析研究室(吉野・鈴木研)の紹介

機械システム工学科 教授 吉野 正人・助教 鈴木 康祐

有機系薄膜のエレクトロニクス応用(伊東研究室紹介)

電気電子工学科 教授 伊東 栄次

曹研究室の紹介

土木工学科 助教 曹 西

金子研究室の紹介

建築学科 教授 金子 洋文

吸着・触媒化学研究室

物質工学科 准教授 岡田 友彦

見えない未来の攻略法:オンライン最適化

情報工学科 准教授 藤原 洋志

身近な流れを利用するエコ水車発電

環境機能工学科 准教授 飯尾 昭一郎

目 次

技報「こまくさ 13 号」発刊に当って

／一般財団法人信州大学工学部若里会 副理事長

信州大学名誉教授 小沼 義治…………… 1

研究助成報告

携帯電子機器における受信回路用高効率 LNA に向けた高 Q 集積化 RF インダクタの開発

／電気電子工学科 曾根原 誠…………… 2

Na 型マイカの大気中焼成による低温合成と膨潤化

／物質工学科 山口 朋浩……………11

研究室紹介

熱流体解析研究室（吉野・鈴木研）の紹介

／機械システム工学科 教授 吉野 正人・助教 鈴木 康祐……………15

有機系薄膜のエレクトロニクス応用（伊東研究室紹介）

／電気電子工学科 教授 伊東 栄次……………16

曹研究室の紹介

／土木工学科 助教 曹 西……………17

金子研究室の紹介

／建築学科 教授 金子 洋文……………19

吸着・触媒化学研究室

／物質工学科 准教授 岡田 友彦……………20

見えない未来の攻略法：オンライン最適化

／情報工学科 准教授 藤原 洋志……………21

身近な流れを利用するエコ水車発電

／環境機能工学科 准教授 飯尾 昭一郎……………22

技報「こまくさ 13 号」 発刊に当って

一般財団法人信州大学工学部若里会 副理事長
信州大学名誉教授 小沼 義治

ここに、一般財団法人若里会による技術情報誌、技報「こまくさ 13 号」を発刊する運びとなり、ご多忙の中ご尽力頂いた著者、関係各位に謝意を表します。

今年、日本は戦後 70 年を迎えて居ります。日本国民の勤勉性、努力、技術力により、幾多の艱難辛苦を乗り越え、戦後復興を成し遂げ、高度経済成長にまで達し、金融危機、デフレ不況を経験し、暫く日本経済は停滞気味にありましたが、金融緩和、円安による景気の光と影はあるものの、景気回復の兆しが見えつつあります。この上更に立ち直り長期的視野に立った実のある日本本来の経済発展を遂げるために、資源の無い日本です。科学技術立国を目指して、研究・教育、技術開発に幅広い投資を望みたい所です。

しかし、大学における環境は、年々厳しさを増し、短期間での成果が求められ、長期的視野に立った基礎研究、萌芽的研究の遂行が難しくなっています。現在、話題となっている幾つかの大型プロジェクトも、嘗ては基礎研究の積み重ねの研究成果であり、初期の段階では副産物でしかなかった物が少なからずあります。今この時代だからこそ、長期的視野に立った幅広い研究環境を望みたい。又最近発表された経済財政改革の基本方針（平成 27 年 7 月 1 日、朝日）の名の下に、大学改革に於いて、更に大学間競争が激化し大学の差別化が図られようとして居ります。この様な状況下で、特に将来に向け期待される若手研究者・教育者の研究面における資金不足が深刻化し、成果を挙げるまでに時間の要する基礎研究、独創的萌芽的研究に向けての研究時間が割けなくなりつつあります。

当財団法人若里会は、平成 23 年度から信州大学工学部及び関連する大学院等に在籍し大学の教育・研究に携わっている若手研究者を対象として、独創的研究に対して助成を行って居ります。昨年の研究助成募集に当り、公募数 2 件に対し、若手研究者から 10 数件の応募があり、資金的に切迫している状況を示して居ります。その応募者の研究申請において、研究計画が緻密、将来展望があるものばかりですので、選考には大変苦慮致して居ります。採択率は、一般の科学研究費のそれより可成り低くなって居り、今後資金面、運用面で、検討して行きたい所です。財団で行っている研究助成が、研究の緒に着いたばかりの若手研究者の研究の一助となり、独創的発明・発見を通して、研究の喜びを味わって頂くとともに技術革新に繋げられる事を期待致します。

尚、本情報誌には、研究助成採択者の研究中間報告 2 件を掲載致すとともに工学部内の学科・研究室等の最新情報を順次紹介致して参りますので、ご参考にして頂ければ幸いです。

携帯電子機器における受信回路用高効率 LNA に向けた 高 Q 集積化 RF インダクタの開発

信州大学工学部電気電子工学科 先端磁気デバイス（佐藤・曽根原）研究室
准教授・博士（工学） 曽根原 誠

Development of High- Q Integrated RF Inductor for High efficiency LNA of Receiving Circuit in Mobile Equipment

Makoto SONEHARA, Associate Professor / Dr. Eng.,
Advanced Magnetic Devices (Sato and Sonehara) Lab., Dep. of Electrical and Electronics Eng., Fac. of Eng., Shinshu Univ.



1. はじめに

近年、携帯端末の多機能化が著しく進展しており、通話機能以外に GPS、無線 LAN、Bluetooth 等の様々な無線機能が搭載されている。また、第四世代通信規格として注目されている LTE-Advanced¹⁾ では複数のアンテナを用いた MIMO (Multi-Input Multi-Output) による通信が採用されるなど無線回路部の増大が進展している。このような多機能化の進展に伴う携帯端末内の無線回路部の増大は、携帯端末の体積増加の要因となってしまう²⁾。図 1 に CMOS-LNA (Low Noise Amplifier) 回路の一例を示す³⁾。図 1 より RF 回路は能動素子だけでなく抵抗やインダクタ、キャパシタといった多くの受動素子によっても構成されている。図 1 (a) の中央部に 2 個配置されているのは、平面スパイラル空心インダクタであり、面積の大部分をインダクタで占めている。従って、RF 回路においては特にインダクタ素子の小型化あるいは RF-IC への集積化が急務となっている。これらが実現すれば、回路の小型化のみならず不要な配線ロスを低減でき、LNA の高効率化にもつながる。

RF-IC への集積化としては、図 2 に示すようなチップサイズパッケージ (CSP) などが提案されている。しかしながら現状の空心インダクタでは、図 2 (a) に示すようにインダクタから漏洩する交番磁束が近傍素子・配線で誘導現象を生じさせノイズを重畳させてしまういわゆるクロストークノイズが問題になる。この解決策として、図 2 (b) に示すように磁性薄膜で平面スパイラル空心インダクタをサンドウィッチする構造の磁性薄膜インダクタの開発が進められてきた⁴⁾。ところが従来の磁性薄膜インダクタではインダクタンス L の増大、クロストークノイズ抑制には効果が期待できるが、交流損失の増大により、空心インダクタよりも高い性能指数 Q 値を得ることは困難である。なお、 Q 値は次式で表される。

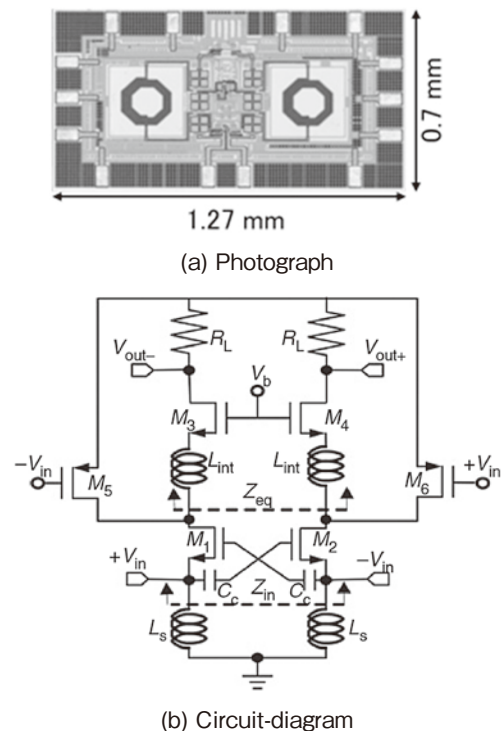


Fig. 1 Typical CMOS low noise amplifier (LNA) in the LTE-RF circuit³⁾.

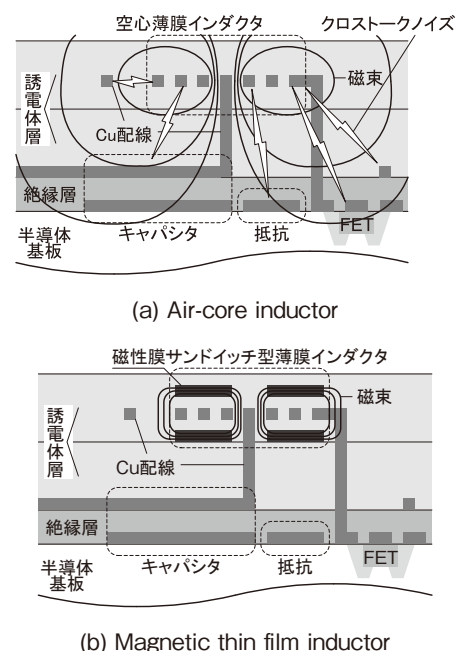


Fig. 2 Schematic view of a chip size package (CSP) RF-IC.

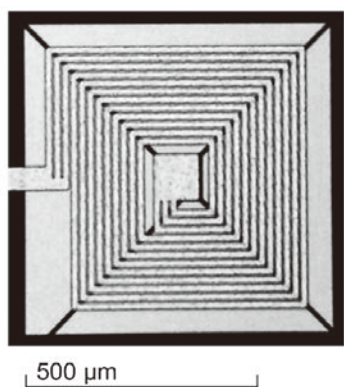
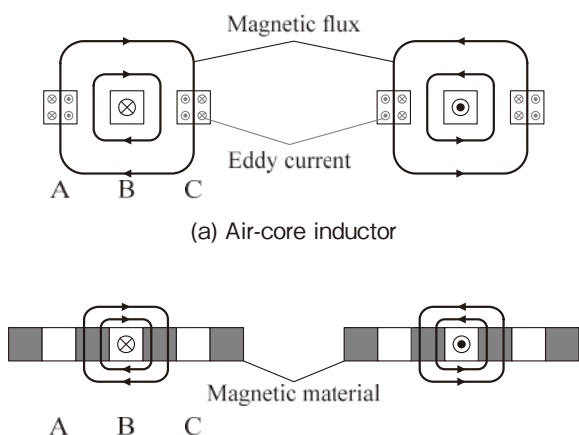


Fig. 3 Photograph of a magnetic thin film inductor with slit in the magnetic film and the conductor line for RF-IC⁵⁾.



(a) Air-core inductor
(b) Embedded magnetic core between conductor lines
Fig. 4 Schematic cross section of the planar spiral inductors.

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (1)$$

ここで、 ω は角周波数、 R は抵抗値である。これは磁性膜におけるうず電流損やコイル導体におけるうず電流損や近接効果による損失が原因であると考えられる。この問題の解決こそが未だ実現されていない磁性薄膜インダクタを用いたCSP RF-ICの実現への鍵となる。

2. 先端磁気デバイス研究室の取り組み

2.1 過去の研究内容

前記の問題に対して、筆者らは既に磁性膜およびコイル導体におけるうず電流損に対しては、図3に示すようにそれぞれスリットを入れることでうず電流の抑制し Q 値が増大することを明らかにした。詳細は参考文献5)を参照されたい。なお、図3の写真は、下から下部磁性膜層（同図中背面の4つの台形）、下部絶縁体層、導体ライン層のみで、実際は導体層の上に上部絶縁体層、上部磁性膜層がある。

2.2 現在の研究内容と本原稿の主旨

次に筆者らは、コイル導体における近接効果による損失の抑制を図るため、導体ライン間スペースに磁性材料を装荷する手法を考案した。図4に概略を示すが、図4(a)のように空心の場合、巻線Bを流れる電流によって生じる磁束が隣接する巻線AおよびCに鎖交する。すると巻線AとCでは誘導現象によるうず電流が発生し、これが損失の原因になる（近接効果）。一方、図4(b)に示すように提案した手法では、各巻線を流れる電流によって生じる磁束は、隣接する巻線よりも透磁率が高い巻線間に埋め込まれた磁性材料をパスすることになり、近接効果による損失を抑制できる。

本稿では、導体ライン間スペースに充填することができる磁性材料として、絶縁体中に磁性微粒子を分散させた構造を持つカルボニル鉄粉／エポキシ複合材料磁心（CIP／Epoxy 複合材料）を使用した。複合材料磁心は初期状態がペースト状であり、インダクタ上面にメタルマスクおよびスキージを用いて塗布することでインダクタのライン間に充填が可能である⁶⁾。また、従来の金属磁性膜より高い抵抗率を持つため、高周波でのうず電流損を低減できる。複合材料装荷インダクタの諸特性および近接効果の原因となる垂直方向の磁束密度分布について電磁界解析を用いて検証すると共にデバイスを作製・評価した。

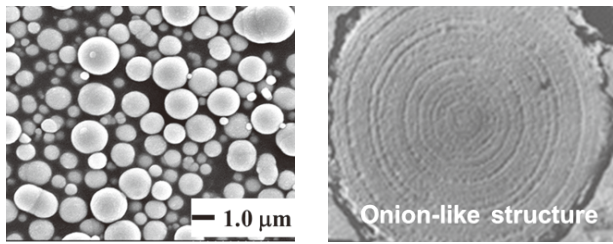
3. CIP 複合材料

3.1 非還元カルボニル鉄粉（CIP）

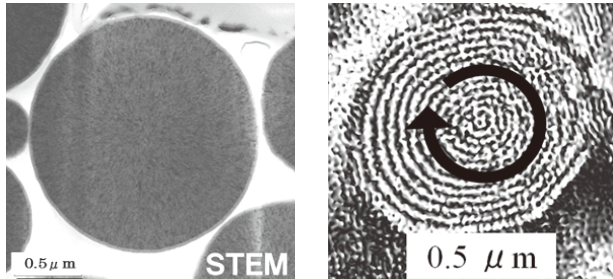
図5(a)に使用した非還元カルボニル鉄粉（CIP, BASF Co.）の断面SEM像を示すが、平均粒子径が1.1 μm で、ほとんどが球形状である⁷⁾。また、図5(b)にSTEM像と電子線ホログラフィによる観察像を示すが、微結晶かつカーリング磁気構造を有しており、静磁エネルギーが小さく、表面に磁極を作り難いことが予想される⁸⁾。図5(c)に振動試料形磁力計（VSM、理研電子；BHV-55）によるCIPの静磁化曲線の測定結果を示すが、飽和磁化は約2.0 Tで、保磁力は800 A/m (10 Oe)と見積もられた。以上、CIPの主な仕様を表1にまとめる。

3.2 CIP／Epoxy 複合材料の作製

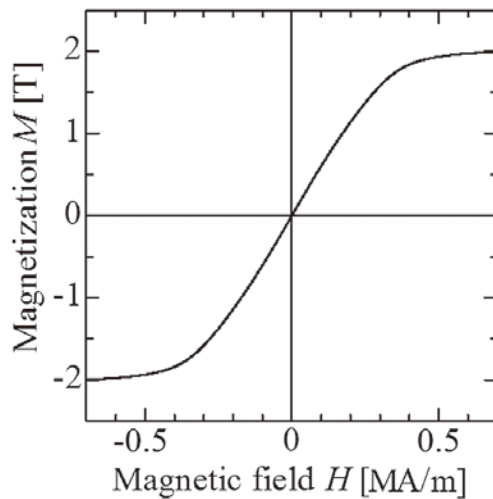
本稿ではCIPとエポキシ樹脂（Epoxy）による複合材料を検討し、作製した。CIPの体積充填率についてであるが、磁性微粒子であるCIPの体積充填率を多くすると複素比透磁率の実部 μ' は増大していくが、それに伴い損失の要因となる複素比透磁



(a) Photograph and cross-section ⁷⁾



(b) STEM image ⁸⁾ and Electron Beam Holography image ⁸⁾



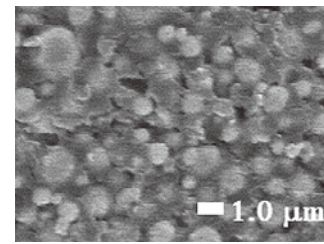
(c) Static magnetization curve

Fig. 5. Photograph, cross-section, STEM (Scanning TEM) image, Electron Beam Holography image and static magnetization curve of carbonyl-iron powder.

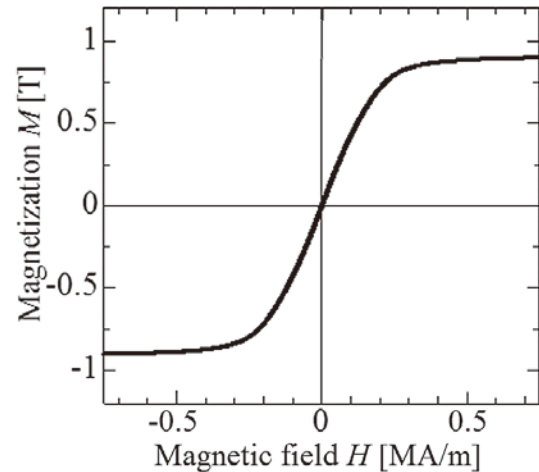
Table 1. Typical specifications of carbonyl-iron powder (Hard Grades; BASF Co.) used for composite magnetic core.

Composition wt. %	Fe content; up to 97.8 %, C ; 1.0 % _{max.} , N ; 0.9 % _{max.} , O ; 0.5 % _{max.}
Mean diameter	1.1 μm
Saturation magnetization	2.0 T (measured using VSM)
Coercive force	800 A/m (10.0 Oe, measured using VSM)

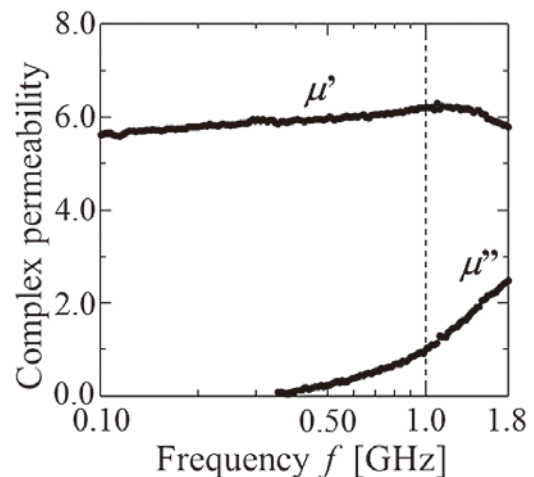
率の虚部 μ'' は増大していくことが先行研究より明らかになっている ⁶⁾。そこで高周波での損失を抑制するために、SUS304 メタルマスクを用いた塗布が可能である粘度を持ち、CIP の体積充填率が最も低い 45 vol.% 複合材料を使用した。



(a) Cross-sectional view



(b) Static magnetization curve



(c) Complex permeability

Fig. 6. Magnetic properties of 45 vol.% carbonyl- iron/ epoxy composite core made by metal mask printing.

CIP / Epoxy 複合材料の特性評価用として、SUS304 メタルマスクを用いたスクリーン印刷法でガラス基板上に 50 μm 厚の厚膜を形成し、大気中で 140 °C で熱硬化させた。図 6 (a) に CIP / Epoxy 複合材料の断面 SEM 像を示す。

3.3 CIP / Epoxy 複合材料の特性評価

図 6 (b) に 45 vol.% CIP / Epoxy 複合材料の静磁化曲線、同図 (c) に複素比透磁率の周波数特性の測定結果を示す。図 6 (b) より、飽和磁化は 0.90 T、保磁力は 2.4 kA/m (30 Oe) と見積もられた。保磁

力がCIP単独よりも3倍大きくなった原因は、熱硬化時の熱エネルギーによって内部応力や磁気ひずみが増加したことによる影響と推測される。

一方、図6(c)より、測定した周波数範囲においては、複素比透磁率の実部は約6.0で、自然共鳴の影響により虚部は0.5 GHzより増加した。複合材料は従来の金属磁性膜と比較して比透磁率は低いが、初期状態がペースト状でありインダクタのライン間に充填すること容易であるため、前述の通り近接効果の抑制による交流銅損の低減が期待できる。また、非磁性樹脂中に磁性微粒子を分散させた構造を有しており、複合材料中の非磁性樹脂が絶縁皮膜として作用するためうず電流は平均粒子径1.1 μmの個々の磁性微粒子内部に生じると考えられる。

4. 複合材料磁心装荷インダクタの特性解析

4.1 複合材料磁心の厚みに対するインダクタの諸特性

複合材料磁心装荷インダクタの電磁界解析には、ANSYS社の完全3次元Full-wave電磁界解析ソフトウェアHFSS(Ver.15.0)を用いた。図7にインダクタの解析モデルの断面図、上面図を示す。コイルは2ターンで導体ライン幅55 μm、導体ライン間スペース15 μmとした。複合材料の複素比透磁率の周波数特性は、測定時および解析時におけるうず電流損失のダブルカウントを防ぐべく、参考文献9)の手法に基づいて図6(c)に示した実測値からうず電流損失分を差し引きフィッティングしたデータを用いた。また、終端短絡1ポートで解析した。

図8(a)に複合材料磁心装荷インダクタのインダクタンス L 、同図(b)に等価直列抵抗 R_s 、同図(c)に Q 値の周波数特性をそれぞれ示す。加えて、同コイル形状の空心インダクタの解析結果も図中に示す。インダクタンス L と等価直列抵抗 R は反射係数 S_{11} の解析結果を用いて次式より計算した。

$$Z = 50 \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}} = R_s + j\omega L \quad [\Omega] \quad (2)$$

また、空心インダクタおよび図7(b)で示した複合材料磁心装荷インダクタにおけるコイル導体中央部の磁束密度の垂直方向成分の分布を図9(a)に、電流密度分布を図9(b)に示す。なお、ポートには振幅1 mA、1 GHzの交流電源を設定した。

図8(a)より、複合材料磁心の厚さ t を厚くすると、インダクタンスがエンハンスされたと考えられる。

一方、図8(b)より複合材料磁心の厚さ t を厚くすると、等価直列抵抗 R_s の立ち上がりが低周波側にシフトすることが分かる。これは低周波側では、

近接効果の緩和より交流銅損が低減するが、高周波側では図6(c)から分かるように複合材料の複素比透磁率の虚部 μ'' による損失が増大するため体積が大きいほどその影響が低周波側から現れるものと推察される。導体間のみを複合材料で充填した条件($t = 0$)の場合、複素比透磁率の虚部 μ'' の影響をあまり受けず、1 GHzにおいても空心より等価直列抵抗 R_s は低い。図9(a)から分かるように導体ライン間への複合材料の充填で、コイルへ垂直に鎖交する磁束成分が減少したことによる近接効果の緩和により、同図(b)から分かるようにコイル導体の電流密度分布の偏りが小さくなり、 $t = 0$ の場合、1 GHzにおいても複合材料の効果が得られていることが分かる。

図8(a)と(b)のインダクタンス L と等価直列抵抗 R_s を用いて(1)式より Q 値の周波数特性が図8(c)のように得られるが、同図よりインダクタンス L と等価直列抵抗 R_s の兼ね合いから、あたかも複合材料磁心の厚さ t を厚くすると Q 値のピークが低周波にシフトするような結果が示された。また、複合材料を導体ライン間にのみ装荷したインダクタの場合、 Q 値のピークは1.2 GHzで29と高い値となっている。また1 GHzにおける Q 値は28.8であり、これは空心インダクタよりも約30 %高い。以上により、RF回路用インダクタとしては、複合材料を導体ライン間にのみ装荷したインダクタが最適な構造であることが分かった。

4.2 コイル形状とインダクタの諸特性

前項では、複合材料を導体ライン間にのみ充填することで、高周波まで Q 値向上を見込めることを示した。本項では、複合材料を導体ライン間にのみ充填する構造において、コイルのターン数やライン幅およびライン間スペースを変えた場合の電磁界解析の結果を述べる。

図10および表2に解析したインダクタのコイル形状についてまとめた。コイルはターン数を2～4ターンとし、導体ライン厚みは5 μm、中央パッドを50 μm角、中央パッドから1ターン目の導体ラインとの間隔を50 μm固定とした。そして、導体ライン幅 w およびライン間スペース s を10～50 [μm]の範囲でそれぞれ10 μm刻みで解析した。また、比較のために同コイル形状の空心インダクタについても解析した。

図11に各コイル形状において、1 GHzにおける空心インダクタのインダクタンス L_0 に対する複合材料インダクタのインダクタンス L の増加分 L/L_0

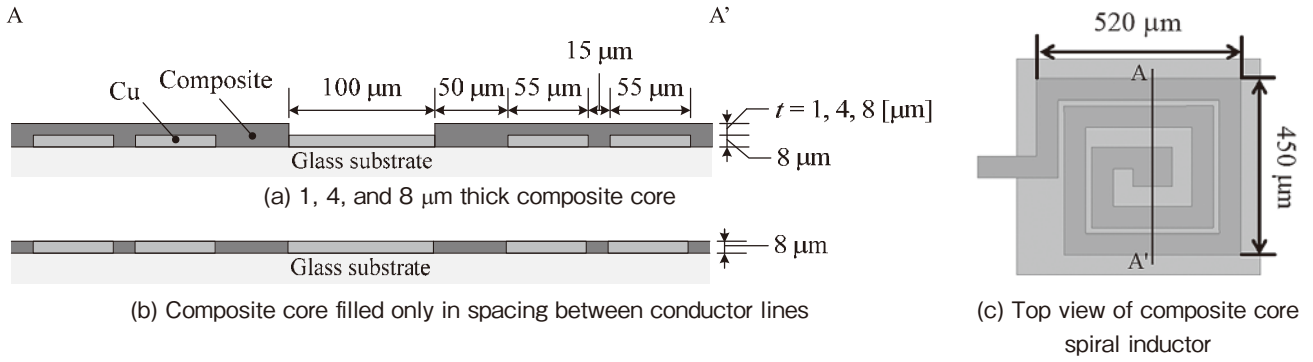


Fig. 7. Schematic cross-section and top view of composite core inductor with changing core thickness.

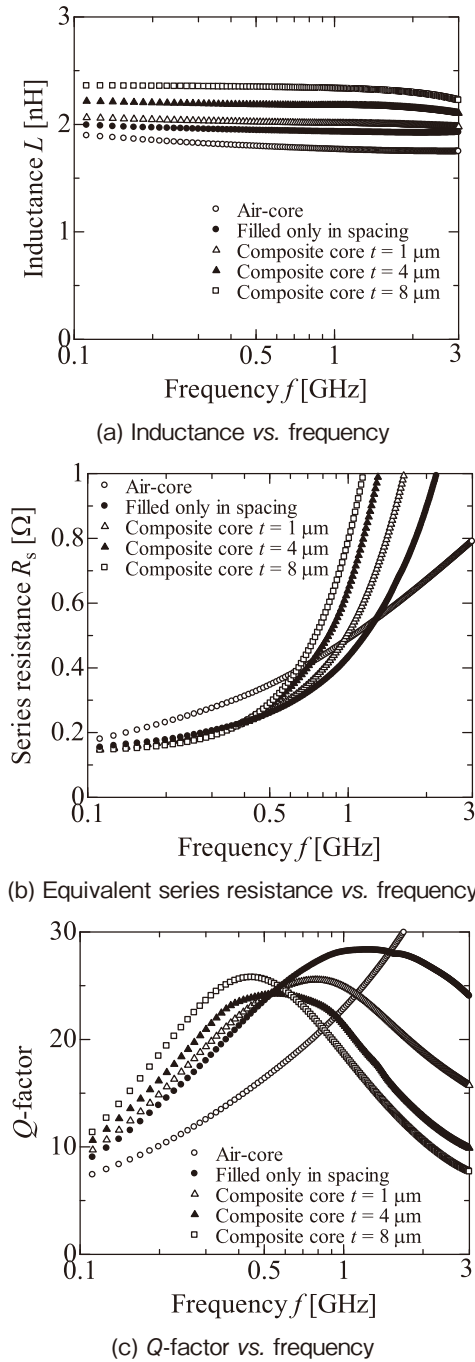


Fig. 8. Calculated several electrical characteristics of the five kinds in spiral inductors with/without composite core.

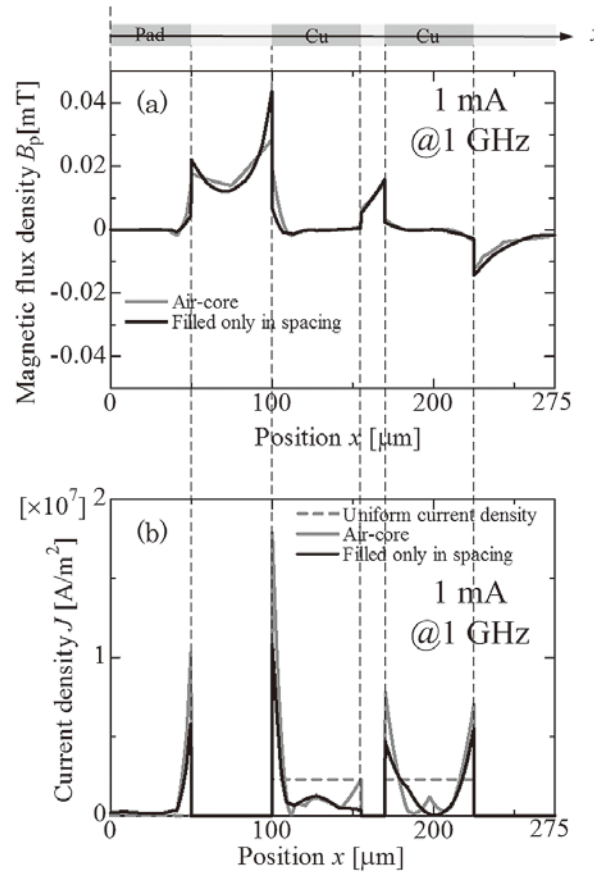


Fig. 9. Perpendicular flux density and current density distribution in the center of coil conductors.

と Q 値の増加分 ΔQ のライン間スペース s 依存性を示す。 ΔQ は次式で計算した。

$$\Delta Q = \frac{Q - Q_0}{Q_0} \times 100[\%] \quad (3)$$

ここで、 Q_0 は空心インダクタの Q 値である。

また、図 12 に図 11 より Q 値の増加分 ΔQ が最大と見積もられた 4 ターン、 $w/s = 50/10 \mu\text{m}$ のインダクタの磁束密度と電流密度分布を、図 13 に図 11 より ΔQ が最小と見積もられた 4 ターン、 $w/s = 10/50 \mu\text{m}$ のインダクタの磁束密度と電流密度分布を代表として示す。

図 11 より、インダクタンス L の増大はライン間

スペース s に依存せずほぼ一定であることが分かる。

一方、 Q 値はライン間スペース s が狭くなるに伴い、 Q 値の増加分 ΔQ は増加する傾向が示された。これはライン間スペース s が狭くなるに伴い、前項でも説明した通り空心インダクタに比べて複合材料磁心装荷インダクタの方が近接効果は抑制できると考えられ、図 12 から分かるようにコイル導体の電流密度分布の偏りが小さくなり交流銅損が低減したためと考えられる。また、導体ライン幅 w を広くすると Q 値の増加分 ΔQ は増加する傾向が示された。導体ライン幅 w が広がると、より近接効果の影響を受け易くなるが、複合材料を装荷することで近接効果を抑制でき、大幅に Q 値の増加分 ΔQ が増加したように見えると考えられる。

本項で示した全てのコイル形状において空心インダクタに比べて複合材料を導体ライン間にのみ装荷したインダクタの方がインダクタンスも Q 値も増加することが解析結果より明らかになった。特にライン間スペース s が狭いインダクタの方がより Q 値を増加できる傾向が示され、これはインダクタの小型化に有利である。

5. 複合材料磁心装荷インダクタの試作と特性評価

5.1 複合材料磁心装荷インダクタの作製

前節の電磁界解析の結果を受けて、導体ライン間にのみ複合材料を装荷したインダクタを試作した。図 14 に作製した複合材料磁心装荷インダクタの上面図および断面図を示す。コイル形状は、2 ターン、 $w/s = 55/15 \mu\text{m}$ 、厚さ $8 \mu\text{m}$ とした。コイル導体はガラス基板上に電解銅めっきにより作製した。その上部よりメタルマスクとスクリーン印刷器を用いて複合材料を塗布し、 140°C で焼成した。その後、

インダクタ上面を研磨することで導体ライン間スペースにのみ複合材料が充填した構造を作製した。図 14 の断面写真から導体ライン間にのみ複合材料が充填されていることが分かる。

5.2 複合材料磁心装荷インダクタの特性評価

作製したインダクタはネットワークアナライザ (HEWLETT PACKARD 社製 ; 8720D) と GSG プローブを用いて、電磁界解析と同様に終端短絡 1 ポート測定し、(2) 式に基づき反射係数 S_{11} からインダクタンス L と等価直列抵抗 R_s を算出した。また、それらを用いて (1) 式より Q 値の周波数特性を算出した。図 15(a) に測定したインダクタンス L の周波数特性、同図 (b) に等価直列抵抗 R_s の周波数特性同図 (c) に Q 値の周波数特性を示す。また、各図に解析値も実線あるいは破線で示す。

図 15(a) から、複合材料磁心装荷インダクタのインダクタンス L は 1 GHz で 2.0 nH であり、これは空心インダクタよりも 22% 高い。これは導体ライン間にしか複合材料を充填していないが、複合材料が有する透磁率によって僅かではあるがインダクタンス L が増大したものと考えられる。一方、図 15(b) から等価直列抵抗 R_s の周波数特性は概ね実測値と解析値は一致した。また、図 15(c) から、複合材料磁心装荷インダクタの Q 値は 1 GHz で 29 であり、これは空心インダクタよりも 29% 高い。これらは前述の通り、近接効果が抑制され交流銅損が低減されたためだと考えられる。しかし、 1 GHz より

Table 2. Coil size.

Number of turns	2, 3, 4 [turn]
Coil thickness	$5 \mu\text{m}$
Line width w	10, 20, 30, 40, 50 [μm]
Spacing s	10, 20, 30, 40, 50 [μm]

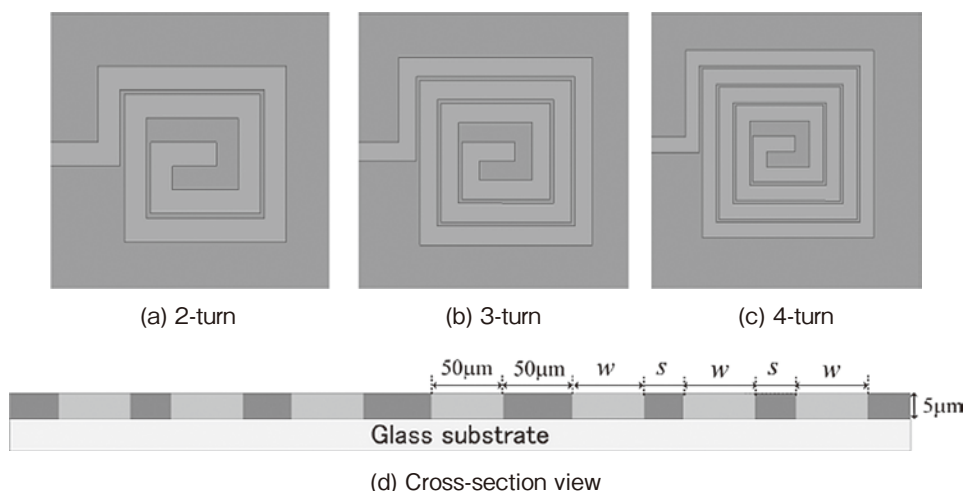
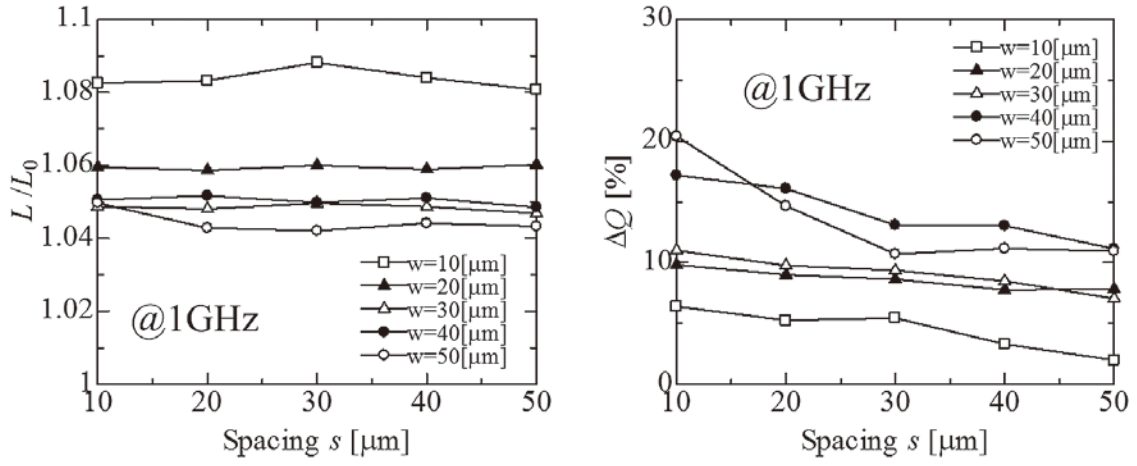
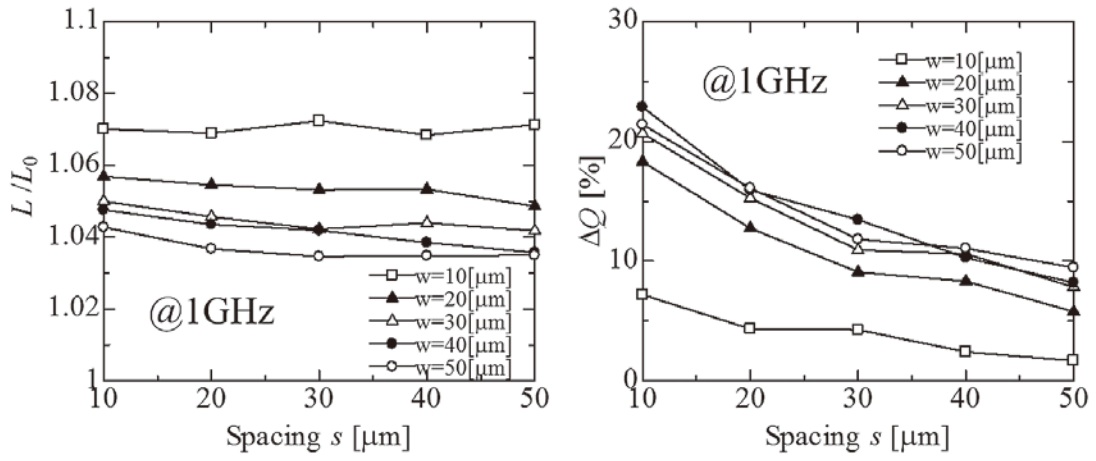


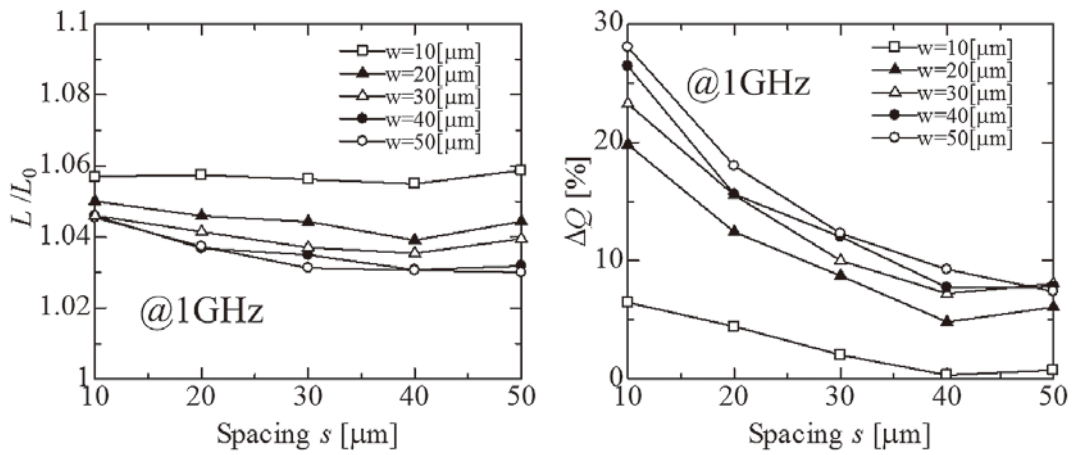
Fig. 10. Schematic view of inductors with composite core filled only in spacing with changing coil structure.



(a) 2-turn



(b) 3-turn



(c) 4-turn

Fig. 11. Inductance and Q-factor enhancement in several inductors with composite core filled only in spacing on the basis of air core inductors at 1 GHz.

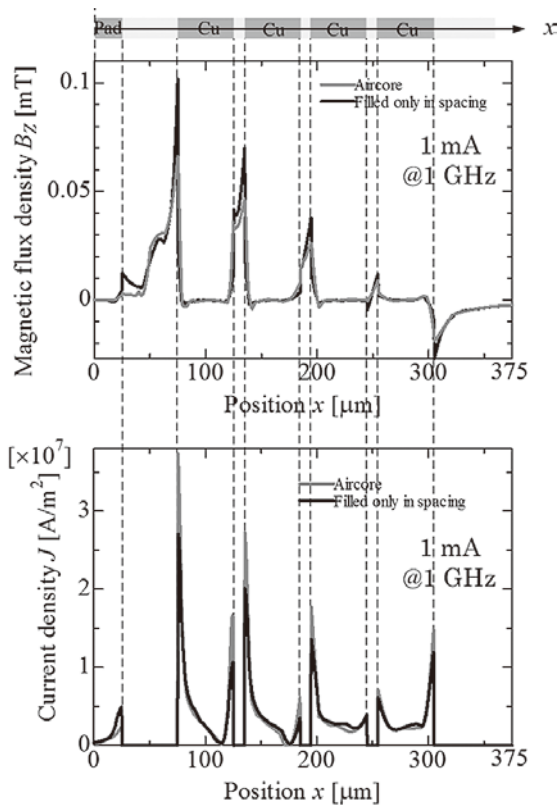


Fig. 12. Perpendicular flux density and current density distribution in the center of coil conductors in 4-turn inductors with $w/s = 50/10 \mu\text{m}$.

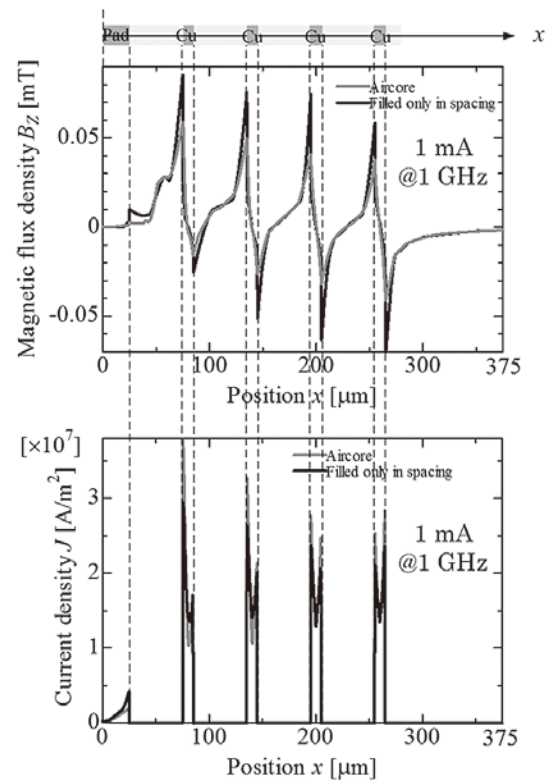


Fig. 13. Perpendicular flux density and current density distribution in the center of coil conductors in 4-turn inductors with $w/s = 10/50 \mu\text{m}$.

高い周波数では Q 値の減少が見られ、これは複合材料の高周波損失による影響であると考えられる。高周波での材料の損失は、粒径の小さい磁性微粒子を用いることや磁性微粒子表面を絶縁材料により被膜することなどで改善が期待できる。

6. まとめ

著者らは RF-IC 向けの薄膜インダクタの Q 値の向上のために交流銅損増大の原因となる近接効果の抑制に着目し複合材料磁心の適用について研究した。コイル導体ライン間スペースに磁性材料を充填することで、導体ラインに垂直に鎖交する磁束が減り、不均一な電流密度が緩和され交流銅損が低減した。45 vol.% カルボニル鉄粉/エポキシ複合材料を用いた場合、導体ライン間にのみ装荷した構造において Q 値が最も高周波まで高いことが分かった。また、コイルのターン数、導体ライン幅、ライン間スペースを変化させても Q 値が向上する結果が得られた。一方、作製したデバイスの測定結果から、1 GHz で 29 と高い Q 値を持ち、これは同コイル形状の空心インダクタの Q 値よりも 29 % 高かった。しかし、1 GHz よりも高い周波数帯域では複合材料の損失により Q 値は低下した。今後は材料の高周

波損失を低減するために、更に粒径の小さな磁性微粒子を用いることや磁性微粒子表面を絶縁体で被膜することなどを検討している。

謝辞

信州大学工学部同窓会および（一財）信州大学工学部若里会には平成 26 年度研究助成として多大なご支援を頂きました。本支援もあり平成 27 年度に日本学術振興会 科学研究費補助金 若手研究 B (15K18047) の採択に至りました。

ここに深謝申し上げると共に、工業製品として初となる GHz 帯用磁性材料装荷 RF インダクタの実現に向けて鋭意努力する所存です。

最後に本研究に対してご助言頂いている同研究室・教授の佐藤 敏郎 先生、試作や測定で主力となって活躍された研究室 OB の降幡 和彰 氏（平成 26 年度修了）および現在も研究を共に進めている現役修士生の渡邊 悠生、宮嶋 優希、加藤 貴規 諸氏に感謝します。

参考文献・WEB サイト

- 1) <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced> (3GPP Homepage,

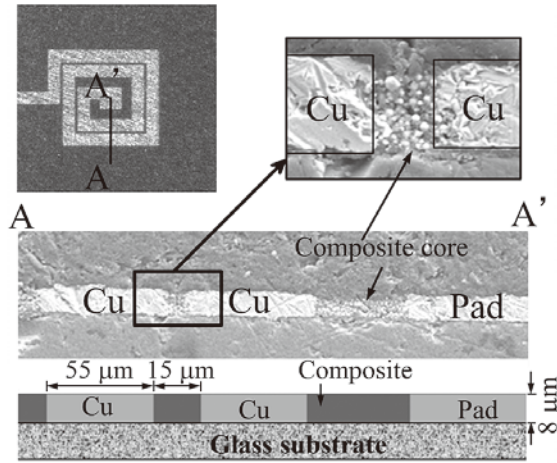
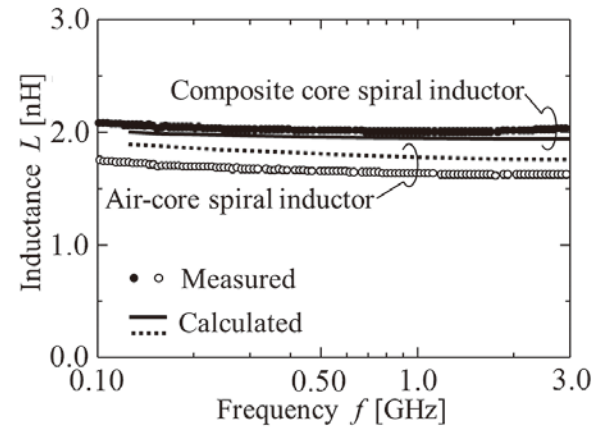


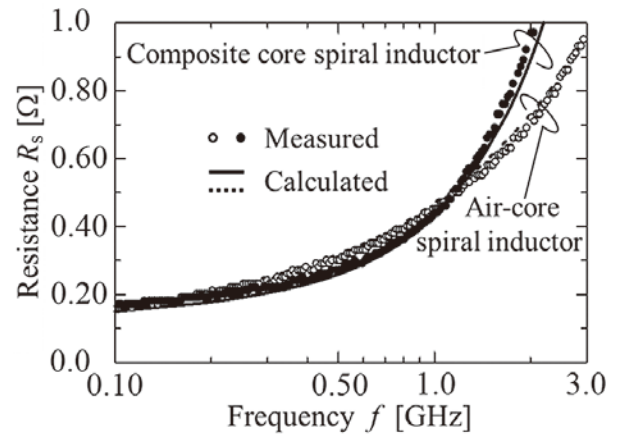
Fig. 14. Top and cross-sectional view of the fabricated spiral inductor with magnetic core filled only in spacing between conductor lines of spiral coil.

accessed 2015-07-14).

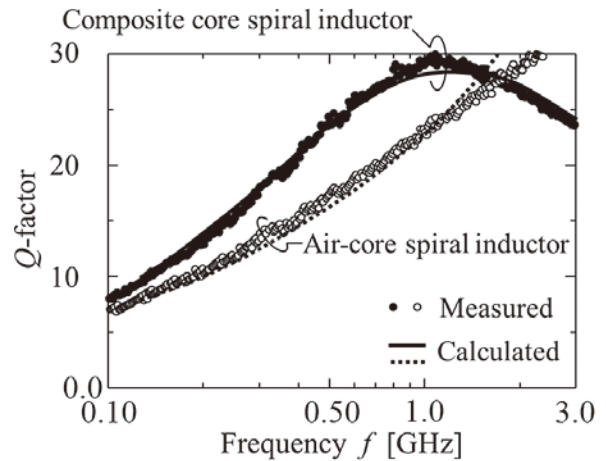
- 2) T. Maruyama, et al.: "Experimental study of cross-talk suppression effect by introducing magnetic thin film to spiral inductor for CSP RF-IC", *The paper of Technical Meeting on Magnetics, IEE Japan, MAG-10-201*, pp.11-16 (2010).
- 3) O.A. Hidayov, et al.: "0.7-2.7 GHz wideband CMOS low-noise amplifier for LTE application", *Electronics letters*, **49**, 23, pp.1433-1435 (2013).
- 4) D. S. Gardner, et al.: "Review of On-Chip Inductor Structures with Magnetic Films", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.**45**, No.10, pp.4760-4766 (2009).
- 5) T. Maruyama, et al.: "Increase of Q -factor of RF magnetic thin film inductor by introducing slit-patterned magnetic thin film and multi-line-conductor spiral coil", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.**47**, No.10, pp.3196-3199 (2011).
- 6) Y. Sugawa, et al.: "Carbonyl-iron/epoxy composite magnetic core for planar power inductor used in package-level power grid", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.**49**, No.7, pp.4172-4175 (2013).
- 7) http://www.monomers.basf.com/cm/internet/en/function/conversions/publish/content/Produkte/Metallsysteme/CIP/CIP_General_PO_e.pdf (BASF SE Homepage, accessed 2015-07-14).
- 8) M. Koeda, et al.: "Research of Carbonyl Iron Powder for Development of the Power Inductor for High Frequency", *IEEE Transactions on Fundamentals and Materials*, Vol.131, No.11, pp.949-954 (2011).
- 9) J. Koguchi, et al.: "Estimation of intrinsic complex



(a) Inductance vs. frequency



(b) Equivalent series resistance vs. frequency



(c) Q-factor vs. frequency

Fig. 15. Measured and calculated inductance, equivalent series resistance and Q-factor of the fabricated spiral inductor with magnetic core filled only in spacing between conductor lines of spiral coil. For a comparison, results of air-core spiral inductor are also shown.

permeability of magnetic material on the basis of measured value", *The paper of Technical Meeting on Magnetics, IEE Japan, MAG-13-172*, pp.95-99 (2013).

Na 型マイカの大気中焼成による低温合成と膨潤化

信州大学工学部 物質工学科

山口 朋浩



1. はじめに

ナノメートルオーダーの厚さのシートが積層して形成される層状結晶の層間域は、立体的に規制された特異な空間として利用可能である。マイカ(雲母)は層状ケイ酸塩の一群をなす鉱物である。マイカ結晶の SEM 写真の一例と積層構造の模式図を図 1 に示す。天然雲母である白雲母 ($\text{KAl}_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) や金雲母 ($\text{KMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) は代表的なマイカであり、様々な分野で利用されている [1,2]。白雲母や金雲母はそれぞれの層間がいわば“閉じた”状態にあり、これらのマイカでは層間域を空間としては利用できない。一方、合成マイカのうち一部のものは、天然のモンモリロナイトに代表されるスメクタイト属の粘土鉱物と同じように、層間が“開いた”状態、すなわち膨潤した状態になり、このような膨潤性合成マイカは層間域を利用した複合体(層間化合物、図 2)を作製するためのホスト結晶として利用できる。

合成マイカに関する研究は、信州大学工学部において、物質工学科やその前身である合成化学科および工業化学科で古くから継続的に行われてきた。合成マイカの研究は、天然の類縁物質に学びながら、天然には存在しない純粋で高機能化した多種多様な

マイカ群を創製しようとするものである。このような研究の中で、膨潤性合成マイカが生まれた。本来、マイカは膨潤しないものであり、先に典型例として挙げた白雲母や金雲母も膨潤しない。しかし、同形置換により構造・組成を制御して層間イオンを Na^+ イオンに置換して合成された Na 型テニオライト ($\text{NaMg}_2\text{LiSi}_4\text{O}_{10}\text{F}_2$) や Na 型フッ素四ケイ素マイカ ($\text{NaMg}_{2.5}\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{F}_2$) は、スメクタイト属の鉱物のような膨潤性を持つことが明らかにされた [3-6]。ここでいう膨潤とは、マイカ結晶の層間域に分子(たとえば水分子)や陽イオンが挿入されて底面間隔が拡大する現象であり、高分子ゲルの 3 次元網目構造の膨潤とは異なる。筆者は、このような膨潤性マイカの合成方法に関する研究や、膨潤性マイカをホスト結晶とした複合体(特に多孔体)の合成およびその構造制御に関する研究を行ってきた [7-9]。

本稿では、若里会からの助成を受けて行っている、簡便な方法での膨潤性マイカの新しい合成方法に関する研究について報告する。途中経過の報告であり、煮詰められたものでないことを予めご容赦いただけると幸いである。

2. 大気中焼成による Na 型マイカの低温合成

合成マイカは、工業的には主に溶融法で 1300°C 以上の温度域で製造される。一方、筆者は、密封白金容器を用いる方法によって $950 \sim 1100^\circ\text{C}$ で膨潤性マイカである Na 型テニオライトを合成できること、および原料混合物に NaCl を添加することにより生成するマイカ結晶の形態を制御できることを報告した [9]。本研究ではこの条件をもとにしつつ、密封白金容器を用いないより簡便な方法で、より低温で、より大きいマイカ結晶を生成するための条件を検討している。

はじめに、化学量論組成の原料混合粉末を一軸加圧成形し、この成形体を白金容器に封入せずにそのまま電気炉で $700 \sim 950^\circ\text{C}$ に昇温して焼成して得られた試料の XRD パターンを図 3 に示す。なお、図 3 には密封白金容器を用いて 950°C で焼成して得られたマイカ試料の XRD パターンも示した。マイカ

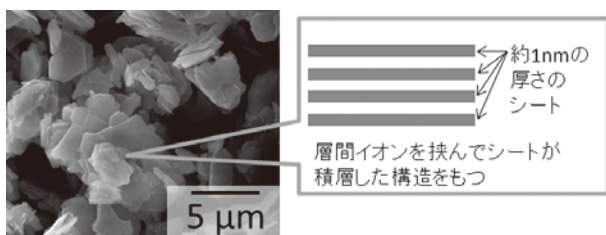


図1 マイカ結晶の SEM 写真の一例

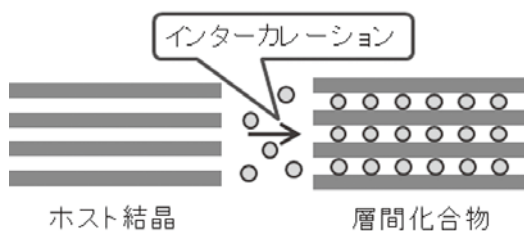


図2 インターカレーションと層間化合物

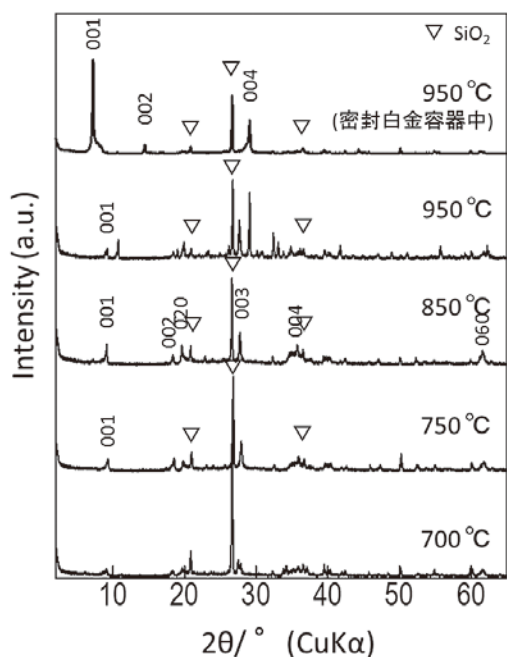


図3 700～950℃で得られたマイカ試料のXRDパターン

結晶に帰属される回折線は750℃から出現しており、この温度付近でマイカが析出し始めることがわかる。また、密封条件下に比べ共生物の析出量が多いものの、850℃で比較的良好にマイカが生成することが分かった。なお、密封白金容器中で得られたマイカでは001回折線が $2\theta = 7.2^\circ$ 付近に出現したが、白金容器を用いずに焼成したマイカではいずれも001回折線が 9.2° 付近に出現した。このことは、本系では膨潤性を持たないマイカが生成したことを示す。なお、本系で生成した膨潤性を持たないこれらのマイカに膨潤性を付与する方法については、4項で述べる。

3. NaClを添加した原料混合物からのNa型マイカの生成

前項において、検討した低温域では850℃付近で比較的良好にマイカが生成することが明らかになったため、焼成温度を850℃に設定し、NaClを添加した原料混合物からマイカを合成することによりマイカ結晶の析出形態の制御を試みた。NaCl添加量は、マイカ原料1 mol当たりのNaCl量が0～2.0 molとなる範囲で変化させた。

NaClを添加した原料混合物を用いた場合にも同様にマイカが生成した。また、この場合も生成するマイカ結晶は膨潤性を示さなかった。なお、生成物中に残留するNaClは、生成試料を蒸留水で洗浄することにより容易に除去できた。

NaClを添加した原料と添加しない原料からそれ

ぞれ得られたマイカ試料のIRスペクトル（図4）において、マイカによる吸収帯（図中に矢印で示し

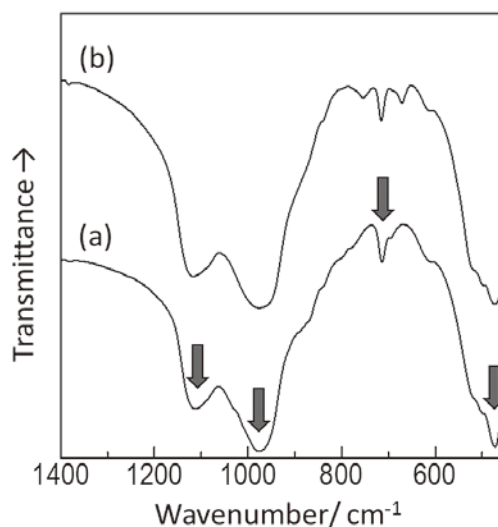


図4 850℃で得られたマイカ試料のFT-IRスペクトル
(a)NaCl無添加、(b)NaCl 1.5 mol 添加

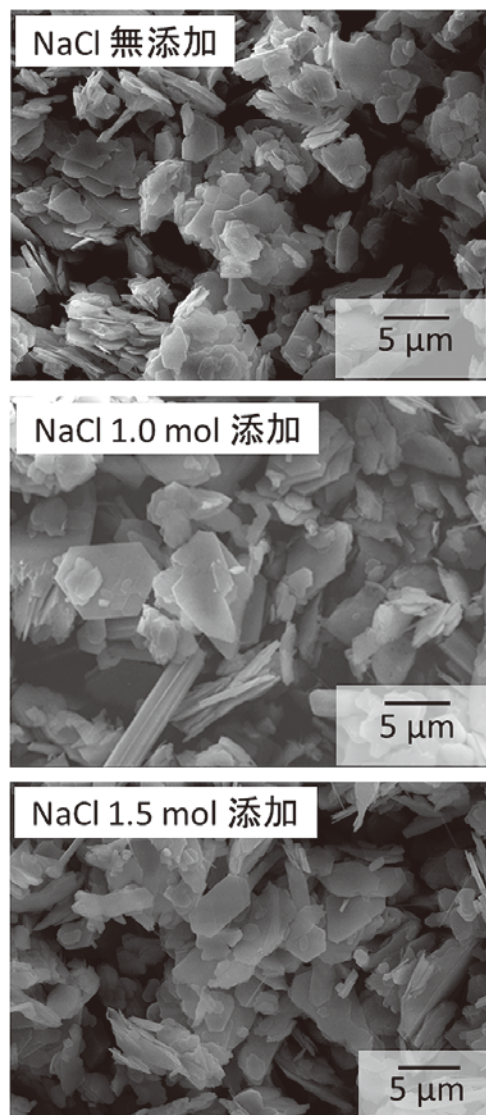


図5 850℃で得られたマイカ試料のSEM写真

た吸収帯)の位置には変化がみられなかった。IRスペクトルの吸収帯位置はマイカの組成に敏感に依存して変化する[3]。これらの吸収帯位置に変化がないことから、生成したマイカの組成は原料へのNaCl添加の有無によらず同一と考えられる。

図5に、NaClを添加した原料から得られたマイカ試料のSEM写真を示す。NaCl添加により六角板状の自形を持つ結晶粒子が生成しやすくなり、また生成結晶が大きくなる傾向が見出された。850℃での焼成中、NaClは液相を形成し、この融液相がマイカの低温生成を促進すると考えられるが、その詳細な反応機構については現在検討中である。また、粒子径のより大きなマイカ結晶を、より均質に析出させるためには、焼成条件や焼成体破断面の均質性評価等の更なる検討が必要である。

4. Na型マイカの膨潤化処理

先に述べたように、本系で得られたマイカは膨潤性を持たなかった。そこで、非膨潤相として生成したこれらのマイカに膨潤能を付与することを検討した。膨潤能を付与するために考案した処理法は、LiCl水溶液中にマイカ粉末試料を投入して室温で所定時間攪拌するだけの、非常に簡便な方法である。

マイカ試料(NaCl 1.5 mol 添加試料)を1.0 mol/lのLiCl水溶液で処理した生成物のXRDパターンを、図6に示す。処理前に $2\theta = 9.2^\circ$ 付近に現れた

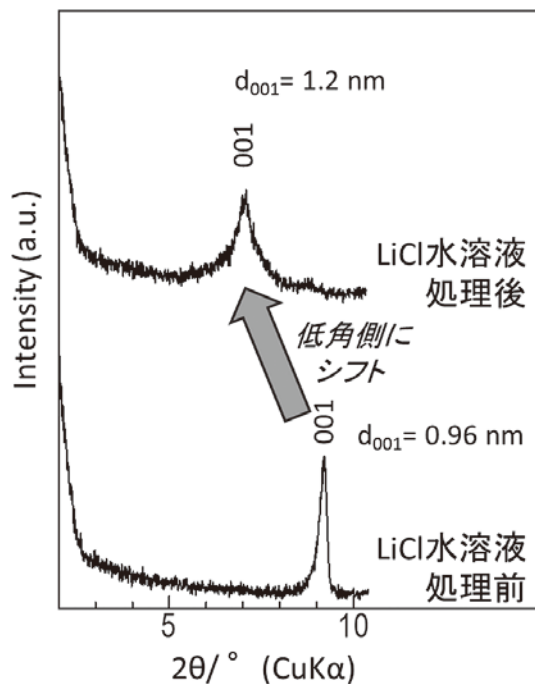


図6 LiCl水溶液処理前後のマイカ試料のXRDパターンの変化

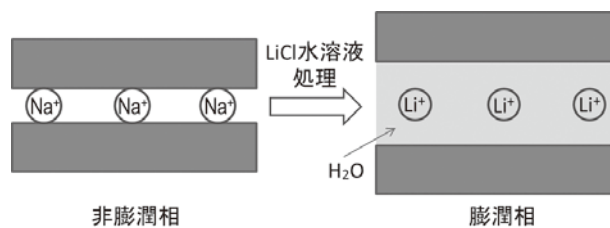


図7 LiCl水溶液処理による底面間隔の拡大

マイカの001回折線は、LiCl水溶液処理によりブロード化しながら低角側にシフトした。この変化は、層間の Na^+ イオンが溶液中の Li^+ イオンと交換したことにともない層間に水分子が侵入し、これにより底面間隔が拡大したためである(図7)。

Li^+ イオン以外の様々な金属イオンや有機陽イオン溶液による処理も体系的に検討したが、現在のところ Li^+ イオン以外の陽イオンでは膨潤能の付与には至っていない。また、LiCl水溶液での処理を水熱条件下で行うと、より低濃度(例えば0.5 mol/l)でも、膨潤能を付与できることも見出している。

5. おわりに

以上のように、密封白金容器を用いる従来の方法よりも簡便(密封白金容器を使わない)、かつ低温(850℃付近)で非膨潤性Na型マイカを合成できることを見出すとともに、生成したマイカに膨潤能を付与できることを明らかにした。これらの知見は、インターカレーションの材料科学に対して、新たな合成法で新たなホスト結晶を提供できることを示すものであり、その展開を期するためにはさらに詳細な反応条件等をつめる必要がある。現在、より大きい粒子のマイカ結晶を、単一相に近い状態で合成するための条件について検討を進めている。また、これらのマイカのホスト結晶としての特性(陽イオン交換容量やイオン交換選択性等)を明らかにし、層間域を利用した機能化についての研究を進める予定である。

謝辞

本研究は、一般財団法人 信州大学工学部若里会の平成26年度研究助成を受けて行ったものであり、関係各位に感謝いたします。

また、本研究は物質工学科無機材料化学研究室で行ったものであり、同研究室の樽田誠一教授、ならびに実験・分析に協力いただいた研究室の学生と技術部の皆様に御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 古賀慎、“粘土とともに (粘土鉱物と材料開発)”、三共出版 (1997)、p.59-69.
- [2] 日本粘土学会編、“粘土の世界”、KDD クリエイティブ (1997)、p.90-92.
- [3] K.Kitajima, F. Koyama, N. Takusagawa, Bull. Chem. Soc. Jpn. 58 (1985) 1325-1326.
- [4] K. Kitajima, N. Takusagawa, Clay Miner. 25 (1990) 235-241.
- [5] K. Kitajima, S. Taruta, N. Takusagawa, Clay Miner. 26 (1991) 435-440.
- [6] 北島圀夫、表面 19 (1981) 83-97.
- [7] T. Yamaguchi, S. Taruta, T. Yamakami, K. Kitajima, Mater. Res. Bull. 42 (2007) 2143-2149.
- [8] T. Yamaguchi, T. Yoshimura, T. Yamakami, S. Taruta, K. Kitajima, Microporous Mesoporous Mater. 111 (2008) 285-291.
- [9] T. Yamaguchi, K. Ikuta, S. Taruta, K. Kitajima, Mater. Sci. Eng. B 177 (2012) 524-527.

熱流体解析研究室 (吉野・鈴木研) の紹介

機械システム工学科 教授 吉野 正人

機械システム工学科 助教 鈴木 康祐



1. はじめに

熱流体解析研究室は、現在、吉野正人 教授と鈴木康祐 助教の二人の教員に加えて、大学院生および学部生により構成されています。また、学部生のうち7名が大学院への進学を希望しています。

当研究室では、複雑な熱流動問題、特にマイクロスケールの気液・液液・固液混相流問題、ならびに移動境界問題に関する研究を、数値シミュレーションによって行っています。計算手法としては、格子ボルツマン法 (Lattice Boltzmann Method、LBM) を中心に、手法の開発とそれを用いた現象解明に取り組んでいます。特に最近では、埋め込み境界法 (Immersed Boundary Method、IBM) を LBM に組み込んだ、埋め込み境界－格子ボルツマン法 (IB-LBM) についての研究にも取り組んでいます。

2. 格子ボルツマン法 (LBM) とは

LBM とは、気体分子運動論のアナロジーを利用して、流体を多数の仮想粒子の集合体 (格子気体モデル) で近似し、各粒子の衝突と並進とを粒子の速度分布関数を用いて逐次計算し、そのモーメントから巨視的な流速、圧力、温度 (濃度) などを求める計算手法です。LBM の特長は、複雑流れに対してもアルゴリズムが簡単で、並列計算に向いており、さらに 質量・運動量の保存性に優れていることなどが挙げられます。

3. 研究事例

① 固体表面に衝突する液滴のダイナミクス解析

気泡や液滴の流れのような気液混相流は、多くの工学的分野に関連した重要な現象です。特に、機械工学においては、燃料電池のガス拡散層内における水の除去や部品表面の塗装コーティングなどにおいて見られ、装置の小型化や安全性への要求から、微視的なレベルでの流動現象を明らかにすることが課

題になっています。当研究室では、種々の物理条件下における固体壁面の液滴の動的挙動解析を行っています (図 1)。

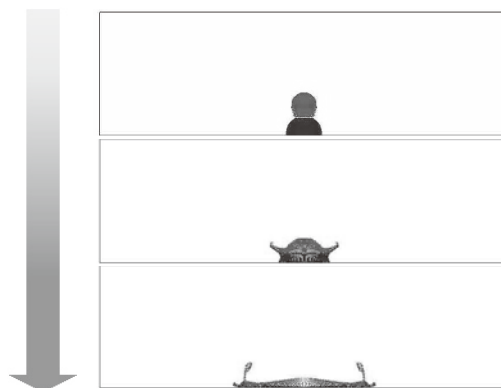


図 1. 二つの液滴が壁に衝突する様子

② マイクロスケールの狭窄部を流れる赤血球の挙動解析

変形する物体を含む流れ場の代表例として、赤血球などの血球を含む血管内の流れが挙げられます。赤血球は粘弾性膜が流体を包む袋状の物体で、血管内において血流による流体力を受け変形しながら流動するため、自身よりも細い血管をスムーズに流動することができます。当研究室では、赤血球の粘弾性特性を表すパラメータを用いた赤血球モデルを構築し、二相系格子ボルツマン法による数値シミュレーションにより、狭窄部をもつ円管内を流れる赤血球の挙動解析を行っています (図 2)。

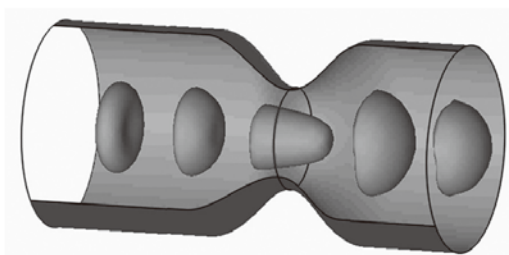


図 2. 狭窄部を流れる赤血球の様子

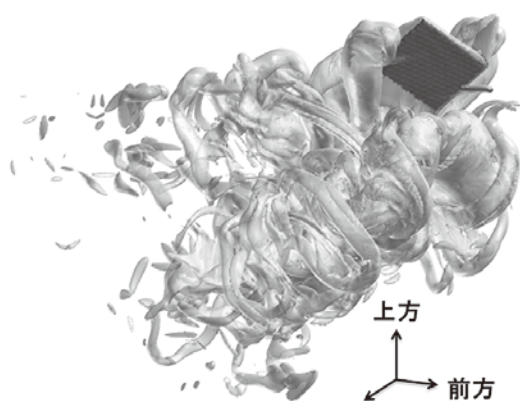


図3. チョウを模した羽ばたき翼モデルの自由飛翔の様子

③ チョウを模した羽ばたき翼モデルの自由飛翔解析
 チョウやハエといった小さな昆虫の羽ばたき飛翔は、生物学においてだけでなく、航空力学においても興味深い現象です。また、工学的応用も期待されており、特に近年では、超小型飛行体（Micro Air Vehicle、MAV）の推進機構の一つとして注目されています。当研究室では、羽ばたき飛翔の MAV への応用を目指し、チョウを模した単純な3次元翼モデルの自由飛翔を、埋め込み境界－格子ボルツマン法を用いた数値計算を通して調べています（図3）。

有機系薄膜のエレクトロニクス応用 (伊東研究室紹介)

電気電子工学科 教授 伊東 栄次



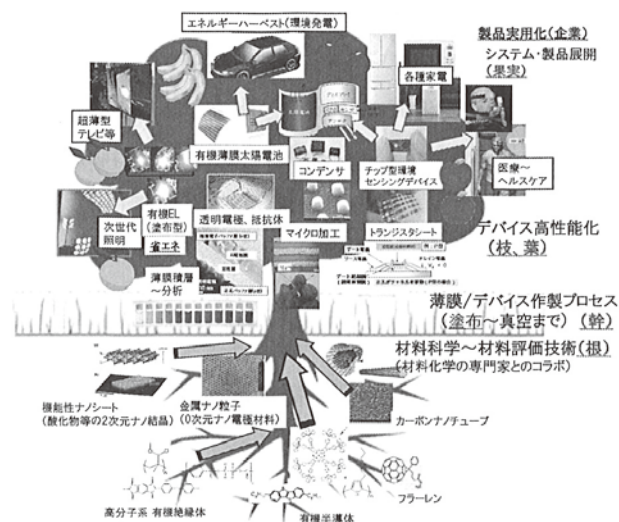
伊東研究室は2009年4月から宮入圭一名誉教授の定年退職を機に宮入研を引き継ぐ形で本格的にスタートしました。現在、学部生5名、修士6名と私の計12名で活動しています。私が信州大学に赴任した1998年当時は主に高分子系の薄膜コンデンサの誘電・絶縁現象の研究を行っていましたが、誘電体の概念を引き継ぎつつ徐々に有機系の光・電子材料を用いた有機系エレクトロニクスにその中心をシフトして現在に至っています。また、2015年4月からは電気電子工学科東棟4階から西棟2階（旧電気工学科上村研）に移り、より実践的な研究にも取り組んでいます。



研究室の様子

ところで、有機系エレクトロニクスって一体何だろうと疑問に思う方もいるでしょう。有機系エレクトロニクスは肝になる部分には有機材料を使いつつも適材適所に酸化膜やナノカーボン、金属等を組み合わせながら、薄膜太陽電池や有機EL素子（OLEDとも呼ぶ）、薄膜トランジスタ、環境センシングデバイス、及びそれらを支える誘電体薄膜や、導電体を開発する技術分野になります。材料ベースの研究には、(i)とにかく材料の物性を調べたり新材料を創成（化学の世界では合成）する段階、(ii)それを薄膜デバイス等にして発現する機能や性能を検証する段階、そして(iii)新しい応用分野を開拓したりすでに類似の技術が存在する場合は何か性能面で優位性のあるレベルまで高めて普及を目指す段階があるかと思います。同分野にシフトした当初は(i)～(ii)の段階にあり、一部では花火の様に盛り上がりつつも実用化の一手手前までくるとその壁にぶつかってしまう等、なかなか夢と現実が乖離したような中で学生たちを半ばはったり交じりで鼓舞していたように思います。しかし、最近になってようやく(ii)～(iii)の段階に移行するものが増えています。有機系薄膜デバイスの売りは何と言っても薄くて軽い、蒸着や塗布により短時間で大面積のデバイスを実現できることです。例えばフィルム基材や曲がる薄板が

ラスに巻き取りながら製造すれば毎分 10m を超えるようなスピードでシート型の電子デバイスを製造可能と考えられています。その典型である有機薄膜太陽電池は 2010 年以降電力変換効率が 10 ~ 15% といったものが次々と報告されており研究室でも 5% を超えるものが学生の手作りで実現できます。最近では有機 - 無機ハイブリッド構造を用いて Si に並ぶ 20% を超えるものも出現しているようです。有機 EL ディスプレイもついに超薄型 4K テレビが国内でも販売されるようになり、価格も現実的になって 2020 年代には本気で液晶と置き換わる可能性が増しています。発光効率や寿命でも LED にさほど引けを取らない性能が得られるようになったことでシート型照明にも派生すると期待されます。センサについても、例えば本研究室で世界最高速レベルのリアルタイム高感度湿度センサを実現しています。有機系ならではのバイオ・化学センサが登場するのもそう遠くないと思われます。



有機系ナノエレクトロニクス技術が拓く技術の木

これまで、実用化は直ぐには難しくても苦労したり考えたことは必ず糧になると学生に言ってきましたが、今後は研究内容の実用化に卒業生が貢献できる位に発展させていきたいと考えています。

曹研究室の紹介

土木工学科 助教 曹 西



曹研究室の一期生は 2008 年 4 月に入ってきました。初めて研究室を持ちましたので、とても深く印象に残りました。配属定員通り、女子 2 名と男子 1 名が入ってきました。女子 2 人は高専編入生でしたが、とても優秀でした。私は高専の先生に「高専の学生は優秀ですね」と言ったところ、その先生は「みんなが優秀ではありません。優秀の学生しか信大に推薦していません」と答えました。2 人は勤勉で、努力家で、クラスメートとも仲が良く、その年、曹研は他研究室の卒研究生がよく集まって来る場所になりました。大学の文化祭には、女子 2 人が主役になり、前日から、店の準備で慌ただしい雰囲気の中、研究室でメインメニューのおでんをたくさん煮込んでいました。就職は研究室に入った時点で、1 人は既に希望通り東京電力から内定を頂きました。残念なことに、彼女が就職してから 2 年未満で、東北地震及び福島第一原子力発電所の事故が発生し、東京

電力の人氣が一気に下がりました。男子学生は見た目でも土木屋にぴったりする感じの若者で、土木の会社なら、どの会社もほしいタイプの学生で、口数は少ないが、黙々と勉強も研究もしっかりやる優秀な学生でした。男子学生も曹研に入った時点で、既に希望した大手土木会社より内定が決められました。

「光陰矢の如し」。曹研が発足してから 7 年位経ちました。現在、6 名の学生がおります。土木構造物の劣化要因、橋梁の長寿命化、橋梁のマネジメント技術、劣化したコンクリート橋梁の耐震性、土木構造物と環境への熱負荷等に関する研究をしています。此处で簡略な研究紹介をさせていただきます。

人口の高齢化と似ているように、日本では橋梁も老朽化の時代を迎えています。又、人間が長寿命を夢見ているように、どの国も橋梁の寿命を延ばしたいのであります。しかし、橋梁の劣化は複雑な要因

が絡んでいます。設計、使用材料、気象条件、地盤条件、自然災害、使用環境、日常の維持管理、メンテナンス技術等々、様々なファクターが影響しています。地域の土木技術者との橋梁メンテナンス技術研究会の共同研究で、信州発の橋梁点検マニュアルを作成しました。そして、県内外の現役橋梁の点検に実際に我々が作成したマニュアルが使われました。そのフィードバックしてきた点検結果に対して、判別分析、クラスター分析、共分散構造分析、多次元尺度法、ロジット対数線型分析等により、様々な角度から、橋梁劣化の因果関係を明らかにしております。そして、橋梁の長寿命化に繋ごうとしております。写真1と2は、曹研1期生と信州発の橋梁点検マニュアルを用いて、解析対象の橋梁の現場へ点検に行った時の写真であります。



写真1 橋梁点検の現場の近く



写真2 橋梁点検の現場で

今年の夏、インドは暑さにより千人以上の死者が出ただけでなく、道路の横断歩道まで高温よりアスファルトが溶けて舗装が変形した現象が見られました（写真3）。地球の温暖化は全人類が直面する問題であります。これからの土木構造物の設計には、環境への熱負荷も考慮しなければなりません。その為には、構造物の熱パフォーマンス及びその影響要因を明らかにしなければなりません。本研究室は現役の道路・橋梁等の土木構造物を対象に、非定常熱伝導数値解析モデルを構築し、フォートランで計算プログラムを作成し、解析を行いました。対象橋梁・道路の熱パフォーマンスを明らかにしました。図1には、ある橋梁が開通してから今まで実際に経験した一番暑い日の一日を含む56時間の間に橋梁路面及び下面の温度が時間と共に変化するグラフを示してあります。もし逆輻射を考慮しなければ、路面温度は60°を超えています。



写真3 高温による道路の横断歩道の変形（インド）
【<http://news.qq.com/a/20150528/003874.htm>（2015）】

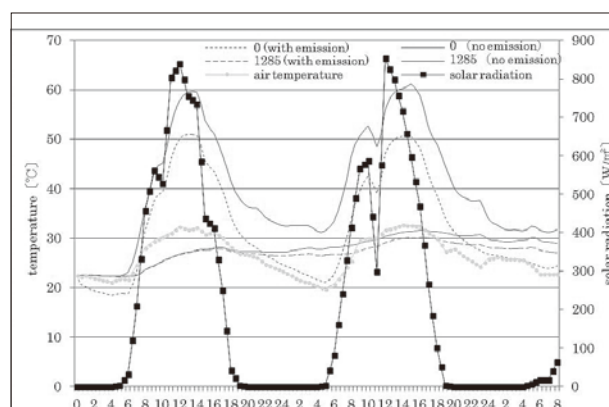


図1 ある橋梁路面の表面と下面の温度変化のグラフ

金子研究室の紹介

建築学科 教授 金子 洋文



1. はじめに

金子研究室は、2014年4月に始まり、今年で2年目を迎えたところです。現在、修士9名、学部生6名で研究活動を進めています。

研究室は、建築構造を専門とし、安心・安全な鋼構造物を設計するために、鉄骨部材・骨組の耐震性能を評価する研究に取り組んでいます。また、木質構造関連についても、それを専門としている松田昌洋助教とともに研究を行なっています。地震に対する多様な構造性能のなかで、建築物の損傷限界（損傷防止）や安全限界（人命保護）を定量的に把握することが重要です。構造部材の弾性から塑性、そして破壊までの挙動を知り、建築物の層間変形角における損傷限界や安全限界と照合します。

研究手段は、構造実験が主ですが、汎用構造解析プログラムの有限要素法解析も併用しています。実験の規模は、構造部材の一部を取り出す要素から実大部分架構、さらに数層の建物規模にわたります。

2. 解析的研究

構造部材の破壊現象は座屈と破断です。有限要素法解析は、コンピュータを用いた数値実験です。座屈を伴う破壊に対する性能を高い精度で評価します。図1は、正方形平板の座屈後の実寸の大変形を示します。対向する載荷辺に、一様に圧縮変位を与えました。鋼材の平板は、座屈による面外たわみが板厚の1/2程度になると、塑性化により耐力が低下します。図1は、大変形まで弾性の現状実在しない材料です。この場合、非載荷辺が板の中央に向かって折れ曲がって移動する時、上昇していた荷重が急

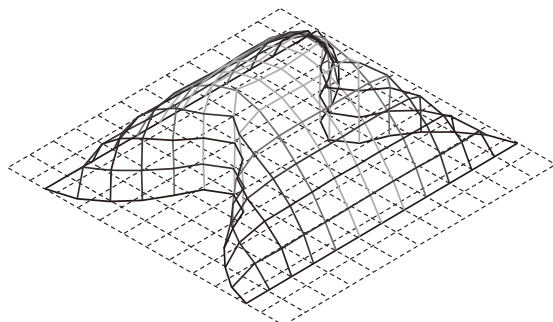


図1 平板の座屈後大変形

激に低下します。このように数値実験は、実挙動だけでなく、未知の世界も知ることができます。しかしながら、有限要素法解析は、部材の破断を伴う挙動を追跡することは現状において困難です。この場合、数値解析データを基に、破壊力学を用いて脆性破壊に対する安全限界を評価する方法を取っています。

3. 実験的研究

写真1は、兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）の時に破断した実建築物の梁端下フランジ（a）とその後の再現実験（b）の状況です。実験は、その実験条件において実挙動を示します。構造部材の限界性能を把握するために実験を行ない、建築物の地震に対する性能を評価します。また、有限要素法解析で解明が可能な場合でも、解析精度の確認、解析条件の妥当性を判定するために基本実験を行ないます。

実験の工程は、加力装置の組立、試験体の設置、計測機器の取り付けの後、加力・計測・試験体観察などです。構造実験を実施するためには、小規模実験で2人、実大部材実験で3～4人がかりです。



(a) 被災した梁部材



(b) 試験体

写真1 梁端下フランジの破断状況

4. おわりに

建築構造の研究は、基本的に実験を伴います。研究テーマを担当する学生は、実験計画・準備をしますが、実施には仲間の力を借りることになります。これにより、協調性、指導力などを養うと共に、他の研究に参画し、幅広く専門知識を修得します。有限要素法解析は、限られた試験体数による実験値を補い、理論展開が困難な設計式を誘導したりします。解析は、データを入力すれば、結果が出力されます。しかし、その結果が妥当かどうか、理論値や実験値と比較すること、解析条件を適切に設定すること、などが重要であることを学生は理解します。

吸着・触媒化学研究室

物質工学科 准教授 岡田 友彦



工学部の物質工学科に所属する本研究室は、吸着、触媒をキーワードに新しい材料づくりに取り組んでいる集団です。今年度は修士課程5名、学部生8名が所属しており、宴会好きな学生が多いことから、研究室内外の交流も盛んでにぎやかな雰囲気です。当研究室では、比較的柔軟に構造と形状を制御することが可能なシリカ系の粒子に興味を持ち、材料設計を行っています。

1. シリカマイクロカプセルの調製と触媒応用

油の中にマイクロメートルレベルの微小な水滴を分散させ、この界面でシリコンのような樹脂を生成させ、乾燥すると中空状のカプセルが形成します。微小水滴に磁性体の原料を含めると、磁性体ナノ粒子を内包することができます。当研究室では、この磁性体内包シリカ粒子の表面を特殊な化学処理（スルホン化）をすると、磁石で回収可能な陽イオン（鉛等の有害金属イオン）の吸着剤あるいは有機物を加水分解できるような固体酸として応用できることを示しました。熱処理によりシリコン樹脂を緻密なシリカに転換すると、内包された磁性体は酸性水溶液（1M 塩酸）にほとんど溶出しなほど化学的に安定になるので、例えば鉛イオンが吸着された状態で酸処理して再生しても、磁性体は劣化せず繰り返し使用できるという特徴があります（図1）。

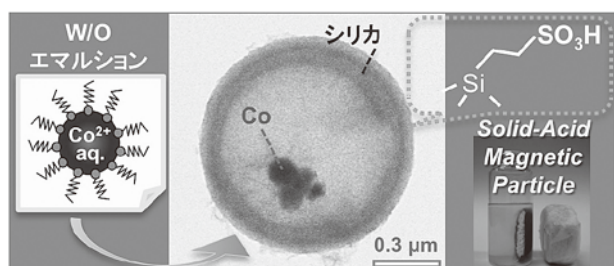


図1 コバルト内包シリカカプセルでつくる磁石で回収可能な固体酸

2. 層状ケイ酸塩の新たな応用

層状ケイ酸塩は、天然では粘土鉱物として広く産生されており、水を含めると容易に膨潤するので、地すべりを引き起こす要因ともいわれています。こ

の層状ケイ酸塩は、陽イオン交換性を示すだけでなく、様々な有機分子を吸着させることができるので、工業的には非常に有用な素材です。最近、ある種の層状ケイ酸塩がカフェインを選択的に吸着できることがわかりました。

このような特徴のある層状ケイ酸塩が、非晶質なシリカ粒子の表面で均一に成長する現象を見いだししました。シリカ球状粒子の一部を層状ケイ酸塩の出発物質として利用するという新たな発想です。尿素の加水分解で生成したアルカリにより球状シリカが一部表面から溶出し、他の原料（LiF、MgCl₂）と反応して図2のように1 nmの厚みをもつシリケートがシリカ表面から成長すると考えています。もとのシリカの形状を損なうことなくシリカ表面に層状ケイ酸塩を被覆でき、しかも水中で使用しても剥落せず容易に回収可能である点が特徴のひとつです。化粧品素材としての応用や、光学異性体（アミノ酸であるようなL体とD体）を分離できる液体クロマトグラフィー用カラム充填剤への応用も検討しています。

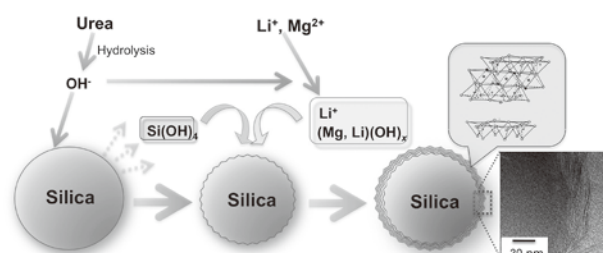


図2 シリカ表面上における層状ケイ酸塩の結晶成長

3. シリカ系以外の研究について

廃棄プラスチックの中でも取り扱いが比較的難しいポリ塩化ビニル（PVC）の新たな処理方法の開発も行っています。PVCを焼却すると塩化水素ガスが発生します。我々は、酸化亜鉛を用いると、PVCが熱分解する温度よりも低い温度（200℃）で脱塩化水素されることを見いだししました。また、塩化水素ガスの発生することがないクリーンな方法として注目しています。このプロセスでは、ポリマー

が液化せず固体として残ります。現在は、この脱塩化水素物をスルホン化して、固体酸触媒や吸着剤などとして有効利用する方法について検討しています。

当研究室では常圧固定床流通型反応装置を3基所

有していますので、気相の触媒反応についても評価することができます。低分子の有機化合物の分解無害化やメタン等の炭化水素から高効率に水素を取り出す触媒反応等を中心に、高活性な触媒を提供できるよう研究を進めています。

見えない未来の攻略法：オンライン最適化

情報工学科 准教授 藤原 洋志



1. はじめに

私は2014年5月に情報工学科に着任しました。やってきてみると、信州大学にはやはり長野とつながりの深い教職員が多くいらっしゃることもあり、当初は正直、私とは縁遠いところに来た、という感じがしました。ただ以前より、スキーなどで年間10回ほど訪れており、もとより長野への愛着は人一倍あると確信しております。また幸いなことに、教職員によるテニスが非常に盛んで、早速仲間に加えてもらいました。夏の楽しみができ、生活が断然充実してきました。

2. 研究内容

私の研究室では、アルゴリズムの研究を行っています。アルゴリズムの研究、と一言で言っても、実にいろいろなやり方があります。我々は、まず個々の事例の本質を徹底的に突き詰め、数学の問題としてとらえた上で、それに対するアルゴリズム設計に取り組めます。いろんな事例を見ていくと、共通した仕組みや性質が浮かんできます。事例の本質を突き詰めることで、うまく動作するアルゴリズムはなぜうまく動作するのかが分かってきます。他方、逆にうまくアルゴリズムが作れない場合はなぜなのか、といった背後にある原理が浮き彫りになります。こうした知見を系統的に整理することで、新たな事例に対する即応性を格段に高めます。

藤原研究室では、種々の事例の中でもとりわけ、

未来の情報が絶望的に乏しい（つまり確率分布さえ不明な）状況下において行動選択を迫られる事例に焦点を当てます。このような局面において、「なるべく良い解」を見つける枠組みを「オンライン最適化」と呼びます。従来は、完全な入力情報をもとにして、いかに高速に最適解を導くかが最大の関心事でした。ところが、1990年代に劇的なパラダイムシフトが起きました。情報が不完全であることを前提とし、ゆえに最適解はあきらめ、かわりに「そこそこ良い解」を得る手法へと関心が移ったのです。実際、日常社会においても、判断材料が完全に出そろうまで待ち、熟慮を経て判断を下す、というケースはそれほど多くないように思います。たいていの場合求められているのは、「妥当な見切り」をすることではないでしょうか。

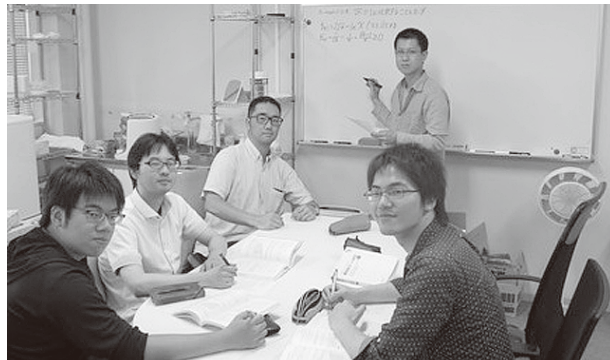
オンライン最適化の一例である「スキーレンタル問題」は、使用期間の不明な耐久財を求める際に、賃貸が得か、あるいはどんなタイミングでの購入が得か、という選択を定式化したものです。冗談のような名前のついた問題ですが、実は家電などに搭載される多段階低電力モード推移の最適化を表現していることで、大きな関心を寄せられています。また別の例の「ビンパッキング問題」は、順次やってくるとアイテム列をそのつどなるべく少ない数のビンに詰めることを目的とする問題です。コンピュータの設計からロジスティクスに至るまで幅広い応用があります。これらは、オンライン最適化の代表格であるにもかかわらず、解明されていないことが数多くあり、注目を集めています。

3. 研究室の活動

先にも書きましたように、私は昨年度の途中に着任しました。研究室としての活動は今年度から始まり、したがって、2015年4月に配属した4年生が記念すべき第1期生です。内心どうなるか不安でしたが、フタを開けてみると、非常に優秀でかつ頼もしい学生さんがやってきてくれました。大変うれしく思っております。

当研究分野では、研究者そのものがじかに結果を生み出します。世界の優れた（特に若い）研究者との交流は、何物にも代えがたい刺激を与えてくれます。研究室の学生にも、（たとえ学生本人が成果発表せずとも）そのような機会をできるだけ多く設けています。

研究室では3つのゼミを開いています。研究の足腰となる数学力を鍛え上げる演習、卒業研究の進捗報告、そして、アルゴリズム関連の英文専門書の輪読です。このうち、進捗報告と輪読については、同じく情報工学科の山本博章教授と合同で行っております。



研究室の様子

身近な流れを利用するエコ水車発電

環境機能工学科 准教授 飯尾 昭一郎



当研究室は、流体工学の観点から環境・エネルギー問題を解決すべく研究開発をおこなっています。流体とは水や空気などの総称です。具体的には、未利用エネルギーの活用による創エネルギー、既存の流体利用分野（空気圧・油圧機器、プラント等）の省エネルギーに取り組んでいます。主な研究テーマは、小規模水力発電、水圧駆動システム、空気圧機器、流体騒音低減です。ここでは紙面の都合がありますので、水力発電に関する研究についてご紹介したいと思います。

一般的に「水力発電＝ダム利用」のイメージをお持ちの方が多いと思いますが、大規模水力発電を新設できる適地は世界的に少なくなっています。そこで、ダム建設を伴わない水力発電が最近注目されています。当研究室では、大きいものでも100kW程度、小さいものでは家庭用の水栓で発電する数十mWのものまでが対象です。開発コンセプトは、「世界のどこでも、誰でも、作れる、使える」です。既存の大規模水力発電をスケールダウンした高級技術で

はなく、小規模水力発電独自のアイデアを導入することで、安くて簡単に高性能な水車の実現を進めています。ランナ（羽根車）の開発がメインですが、それだけでは発電はできませんので、発電機、電力変換装置、除塵装置も含めて企業や他大学と共同開発をしており、取水から系統連系までの一連のシステムを構築しています。

現在、研究室には10名の学生（学部生6名、大学院生4名）が在籍しています。水車開発は、机上での理論解析→コンピュータシミュレーション→実験室内での水車性能試験→実証試験→実用化の流れで進めています。開発対象品だけでなく、試験水路や性能評価設備等も基本的に自作します。図①は人工の水路です。水路角度や流量等を自由に設定することが可能であり、農業用水路を利用する水車の試験や除塵装置の性能評価に使用しています。

水車の実用化は大学のみでは進めることができません。常に企業、水車導入先の自治体、地元関係者との協働です。これまでに導入した発電設備の一例

を図②～④に示します。それぞれ農業用水（インドネシア）、上水道（山梨市）、砂防堰堤（山形県小国町）を利用する発電設備です。農業用水での発電は塵芥対策が不可欠ですが、未開発ポテンシャルが多くあります。写真の現場では近くの村落に電力を供給しています。上水道発電では、既存の減圧弁を水車に置き換えることで圧力エネルギーを電気エネルギーとして回収します。塵芥がない一方で、飲料水の安心安全への配慮が不可欠です。砂防堰堤は全国

に5万箇所あるとされています。ここでは土石流の監視カメラや水位計の電源として利用されています。このように設置地点の状況に応じた水車発電システムの開発を進めています。土木工事を伴わないため環境への負荷が小さく「エコ」ロジー、初期コストが安く「エコ」ノミーな「エコ」水車と言えます。当研究室では今後も身近な流れを利用した水力発電によるエネルギー開発を進めていきます。



図 ①回流型水路(工学部キャンパス)
②プロペラ水車(インドネシア)
③ポンプ逆転水車(山梨市)
④開放貫流水車(山形県小国町)

「技報 こまくさ」 第 13 号 平成 27 年 10 月発行
(非売品)

発行者 一般財団法人信州大学工学部若里会
〒 380-8553

住 所 長野県長野市若里 4 丁目 17-1
TEL (026) 266-8209 (FAX 共有)
E-mail : wakasat@shinshu-u.ac.jp

印刷・製本 株式会社アイデスク
〒 381-0025 長野市北長池 1263-1
TEL (026) 244-4551



一般財団法人 信州大学工学部 若里会