

目 次

巻頭言	1
活動報告	
第 21 回磁気科学会研究会報告	2
第 22 回磁気科学会研究会報告	3
第 12 回磁気科学会年会報告	4
日本磁気学会との連携	5
国際会議等参加報告	
ICMS2017.....	8
MAP8.....	10
開催案内	
第 13 回磁気科学会年会	11
第 22 回磁気科学会研究会	12
第 23 回磁気科学会研究会	13
ICMS2019	14
受賞者の声	
第 7 回優秀学術賞受賞 小山 佳一先生	15
第 7 回功労賞 受賞 渡邊 和雄先生	16
第 7 回功労賞 受賞 Jan Kees Maan 先生	17
講演奨励賞 受賞 大塚 隼人 氏	28
学生ポスター賞 受賞 木村 陽介 氏	29
学生ポスター賞 受賞 片山 大輔 氏	30
会計報告	31
事業計画	32
会則等	
日本磁気科学会 会則	33
理事会運営規則	38
表彰制度	40
役員	42
第 22 回磁気科学会研究会予稿集	43

巻頭言

日本磁気科学会副会長 大塚秀幸 (物質・材料研究機構)

会員の皆様におかれましては益々ご清祥のこととお慶び申し上げます。

今年は磁気科学 25 周年で、年会では記念行事も行われます。1993 年 12 月に北澤先生が科学技術振興事業団のサポートで新磁気科学に関するブレーンストーミングを開催されたのを日本における磁気科学分野の始まりと考えて今年で 25 周年になる、ということです。私自身はこの会議のことは知りませんが丁度同じころに磁場を用いた研究を始めました。磁気科学が始まりつつあった頃の自分自身の初心を振り返りますと、新たなマグネットが導入されて強磁場を得ることができるようになったという感動や、強磁場を使って色々な研究を行うことができそうだという夢と期待に満ちていたことを思い出します。さらには研究会などでも熱気あふれた議論が交わされた当時の状況が改めて蘇ります。当時の初心を忘れずに今後もさらに研究を発展させていこうと思いを新たにする良い機会となりました。

今回の年会に引き続いて磁場発生分科会の研究会も開催します。前回高山での研究会から 4 年経ちました。最近の最先端のマグネットの開発状況や磁場発生技術などについて報告される予定です。ここで得られる情報を基にしてぜひ一度自分の研究に新たなマグネットや磁場発生技術を利用してみることをご一考ください。自分の研究に何か新たな装置や新たな視点を取り入れることで、自分でも思っても見ないような展開が期待できる場合があります。私はこれまで固相変態に及ぼす磁場の影響について研究してきましたが、鉄鋼材料では炭素を含む場合だけに磁場による組織配向が観察されることが分かっています。形状磁気異方性の効果が発現していると考えられますが、組織配向の原因をさらに深く追求すると炭素の物性とどのように関係するのか分かりません。そこで実験のみならず、炭素の基礎物性の解明に第一原理計算の手法を用いてみました。組織配向の問題にとどまらず、それまで実験を通じて自分が抱いていた疑問を全く別の観点から説明できることが多々あり、新たな研究の展開につながりました。新たな視点・切り口は大きく研究を発展させる契機となります。新たなマグネットの利用は新たな研究発展のきっかけを作ってくれると思います。今回の研究会がそのような機会となることを願っております。

第 21 回日本磁気科学研究会 無機・金属分科会 開催報告

物質・材料研究機構 鈴木 達

2017 年の第 21 回研究会（無機・金属分科会）は、2017 年 11 月 16 日（木）に京都大学・百周年時計台記念館において年会終了後に昼休みを挟んで開催された。

プロセス中に磁場が物質へ与える影響は様々に存在し、それらを駆使することにより材料の微構造や自己組織化を制御することが可能となっており、そのためのプロセス開発と磁場作用の基礎研究に関して、新進気鋭の 3 人の講師の方にお話を頂いた。

神奈川県立産業技術総合研究所の高橋拓実先生には、「多層グラフェン被覆粒子を用いた低磁場配向プロセスによる高機能性材料開発」と題して、セラミックス材料における磁場配向に関して、粉体プロセスの適用により反磁性セラミックスであっても超伝導マグネットを用いずに永久磁石により結晶配向させるプロセスを紹介いただいた。

日本工業大の池添泰弘先生には、「手を触れずに物体を動かす ～自己組織化・磁場・光を巧みに利用した新技術～」と題して、光による磁化率の変化に着目して非接触で可逆的に特定の場所だけ磁場に応答させる技術の基本コンセプトの実証を、北澤先生とのエピソードも含めて紹介いただいた。

大阪大学の寺井智之先生には、「鉄系合金の相変態およびセメンタイト析出に及ぼす磁場効果」と題して、セメンタイトの磁場中析出においては結晶磁気エネルギーが重要であることを実証し、また、準安定物質であるセメンタイトの磁気異方性を回転磁場で作製した疑似単結晶を用いて明らかにしたことも含めて紹介頂いた。

どの講演においても、それぞれの課題に対する戦略から述べて頂き、大変に興味深い話を聞くことができ、活発な討論となった。今度の無機・金属分野における磁場の展開がさらに発展することを期待させる有意義な研究会となった。

開催報告： 日本磁気科学会 2018 年 物理化学分科会

「界面現象や生体に関わる磁気科学」

京都大学 奥村 英之

平成 30 年は日本磁気科学会として物理化学分科会の研究会を開催する年であるため、年初から準備を進め、9 月 1 日（土）午後京都大学吉田キャンパス国際科学イノベーション棟において「界面現象や生体に関わる磁気科学」というテーマのもと研究分科会活動を実施した〔詳細は講演概要集参照〕。各分野でそれぞれご活躍の 4 名の演者、〈講演順に〉東京大学石井和之先生、信州大学尾関寿美男先生、大阪大学岡本行広先生、広島大学岩坂正和先生にご講演をお願いし、学会員や社会への還元とともに磁気科学の発展を期した。当日は生憎の雨模様で時折激しく降ることもあったが、約 20 名の参加者が足を運んでくれた。

世話人による開会の挨拶に引き続き、各演者により磁気科学に関する 4 件の興味深い講演が行われた。前半 2 件は光物理化学や界面現象に係る「ポルフィリン化合物の光磁気化学」「界面が介在する磁気現象—吸着、反応、晶出」に関する講演、休憩を挟んで後半 2 件は磁気科学の生体応用を志向した「ナノ粒子ならびにソフトマターの磁場特性を活用した生体分子の分離法」「生体系を取り巻く多様な条件を磁場効果観測に生かす」という内容の講演であった。午後 5 時の閉会まで、活発な質疑応答も含めてほぼ中断なくプログラムは進行し、充実した時間を過ごした感があった。途中、東京および広島からのお土産を皆で頬張るという微笑ましい時間もあった。

研究分科会終了後はお庭の綺麗な南禅寺『順正』に場



所を移して懇親会（一次会）を開催した。分科会出席者の多くは懇親会まで参加下さり、談笑しながら京料理を楽しんでおられたようであった。その後は

京都の中心部（？）祇園四条まで繰り出し、春の桜観光や石畳等で有名な祇園白川のおでん屋さん『菜処やすかわ』にて、引続き懇親の場を持ち歓談に興じた。

お忙しい中、快く講演をお引き受け下さった 4 名の演者の先生方には厚く御礼申し上げるとともに、悪天候にもかかわらず分科会会場までお運び下さった方々にも心より感謝致します。また分科会準備にあたりお力添え下さった諸氏にもこの場を借りて御礼申し上げます。なお本研究講演会は応用物理学会（磁気科学研究会）との共催で実施されました。貴重な写真をご提供下さった横浜国立大学山本先生、日本工業大学池添先生に感謝致します。



第 12 回年会開催報告

京都大学 堀井 滋（実行委員長）

第 12 回年会は、平成 29 年 11 月 14 日（火）～16 日（木）、京都大学・百周年時計台記念館にて開催された。京都での開催は平成 24 年以来の 5 年ぶりであった。初日こそ雨天であったが、学生向け紅葉鑑賞ツアー、KKR ホテルくに荘での懇親会(参加者：63 名)、記念撮影といった外のセッションが開催された二日目以降は天候に恵まれた。また、例年より早く、日ごとに冷え込みも厳しくなりコート・ジャンパーが必要だと思わせるほどであった。しかし、個人的には、この冷え込みは参加者の皆さんに秋が深まりつつある京都（紅葉など）を年会開催時期にも堪能していただける良い気候であったと前向きに捉えている。実際、最終日の夕方に、関東からのある参加者らを真如堂にお連れしたが、案内した当方が見入るほど、ほぼ紅葉シーズンの見事な紅葉を鑑賞できた。

さて、書き忘れてはいけない本来の目的である内のセッション(招待講演、口頭講演、ポスター講演)についても述べることにする。第 12 回年会において、広告協賛 6 社および京都市外郭団体からの学会開催支援や当日申込も含めた 105 名の参加者のもとの、5 件の招待講演、21 件口頭講演、45 件のポスター講演が行われた。第一日目は午後より開催され、主に MHD 関係、金属材料関係の口頭講演が行われた。第二日目については、午前中にポスターセッションが行われ、午後より 2 名の招待講演者による特別講演、当学会功労賞(Jan Kee Maan 氏、渡辺和雄氏)および優秀学術賞(小山佳一氏)の授賞式および受賞記念講演が行われた。その後、学生参加者向け紅葉鑑賞ツアー(16 名参加)、記念写真撮影、総会が予定通り開催され、KKR ホテルくに荘に移動し懇親会(65 名)が和やかな雰囲気で行われた。第三日目については、午前に主に磁場配向・磁場発生に関する 9 件の口頭講演があった。堀井実行委員長による閉会式とともに、若手賞、ポスター賞がそれぞれ 1 名、2 名に授与された。昼食をはさんで、無機・金属分科会による研究会が開催され第 12 回年会の参加者はさらに深く研究成果に関する議論・理解を深めた。

最後に、若手賞の準備、会場設営・撤収やセッションの運営業務、懇親会の進行などに大きく貢献してくださった実行委員の奥村先生(京大)、久住先生(京大)、木村史子先生(京大)、寺井先生(阪大)、諏訪先生(阪大)に加えて、実行委員ではないにもかかわらず年会開催中の写真撮影を快く引き受けて下さった浜崎先生(信州大)に心より感謝申し上げます。



2017 年度の日本磁気科学会と日本磁気学会との連携に ついての報告

吉野電化工業，早稲田大学，物質材料研究機構 杉山 敦史
埼玉県庄和浄水場 森本 良一

日本磁気学会（MSJ）で扱う分野は、「磁気記録」，「ハード・ソフト磁性材料」，「磁気物理」，「薄膜・微粒子・多層膜・人工格子」，「スピニエレクトロニクス」，「計測・高周波デバイス」，「パワーマグネティクス」，「生体磁気・医療応用」と，基礎分野から応用に至るまで多岐に渡っています。活動は，年 1 回開催される学術講演会，年 6 回の MSJ 主催研究会，年 1 回の岩崎コンファレンス，教育活動のサマースクールと初等磁気講座を年 1 回開催，そして当「強磁場応用専門研究会」を含む 8 つの MSJ 専門研究会がそれぞれ開く年数回開催の専門研究会です。MSJ の各専門研究会は，会員・非会員問わず各分野研究者の参加を歓迎しています。

また MSJ は, Journal of the Magnetism Society of Japan, Transactions of the Magnetism Society of Japan の論文誌を刊行しています。新磁気科学分野研究周知と発展の手段として利用検討いただければ幸いです。

強磁場応用専門研究会は，新磁気科学研究会以来の日本磁気科学会（MSSJ）メンバーを中心に，MSJ との連携を目的に設立されました。早 10 年ほど経ちます。2017 年度は廣田先生（NIMS）に全て企画いただき，MSJ 主催研究会と専門研究会 4 つの講演会を開催しました。

次表に 2017 年度に講演くださった講演者と講演タイトルをまとめました。いずれの研究会においても活発な議論が交わされましたこと報告いたします。第 44 回～45 回の専門研究会それぞれでは，故北澤先生と共に新磁気科学（New Magneto-Science）を立ち上げられ，今尚研究を先導し続けられ，また MSSJ 会長を務められた木村恒久先生，尾関寿美男先生，掛下知行先生のご講演をいただきました。

MSJ と MSSJ との接点面積の拡大と強さの増強は，両学会会員の研究をエンカレッジするものと強く思っています。また MSJ は比較的，物理系の研究者が多く，化学系研究者の視点を求めています。

是非とも，MSJ ホームページ（<http://www.magnetism.jp/>）を参照いただき，コラボご検討のほどお願いいたします。

表 1 2017 年度強磁場応用専門研究会開催概要（敬称略）

会名 開催日 (場所)	講演題目（講演時間）	講演者（所属）
第 214 回研究会／第 42 回強磁場応用 専門研究会「強磁場の分析応用」 2017 年 8 月 3 日 13 時～17 時 (中央大学駿河台記念館) 主催：MSJ 参加者 25 人 https://www.magnetics.jp/event/research/semihist/topical_214/	微粒子の磁気分離分析法と磁気光学イメージング法の開発	諏訪雅頼（阪大）
	磁気泳動とマイクロ流路層流系を利用した細胞の分離・選抜	山田真澄（千葉大）
	強磁場固体 NMR の開発と応用	清水 禎（物材機構）
	擬単結晶化法の固体 NMR への応用	久住亮介（京大）
	強磁場 MRI の可能性	関野正樹（東大）
第 43 回強磁場応用専門研究会 2017 年 9 月 25 日 13 時半～16 時 20 分 (大阪大学大学院 工学研究科 A1 棟 111 号室) 共催：低温工学・超電導学会「2017 年度第 1 回 磁場の多様性と利活用に関 する調査研究会」， 応用物理学会 「磁気科学研究会」 https://www.magnetics.jp/special/kyojiba/history/kyojiba_043/	シリカゲル生成過程におけるケイ酸構造の制御：強磁場とアルミニウム添加の効果	笹原茂生（富士化学）
	ポリ乳酸結晶に及ぼす強磁場の影響に関する研究	中山 麗（九大）
第 44 回強磁場応用専門研究会 2018 年 2 月 19 日 13 時半～15 時 (大阪大学大学院 工学研究科 A1 棟 111 号室) 共催：低温工学・超電導学会「2017 年度第 2 回 磁場の多様性と利活用に関 する調査研究会」， 応用物理学会 「磁気科学研究会」 https://www.magnetics.jp/special/kyojiba/history/kyojiba_044/	弱磁性体に及ぼす磁場効果	木村恒久（京大）

第 45 回強磁場応用専門研究会 2018 年 3 月 7 日 14 時～16 時 (大阪大学 東京ブランチ) 共催：低温工学・超電導学会「2017 年度第 3 回 磁場の多様性と利活用に関する調査研究会」，応用物理学会「磁気科学研究会」 https://www.magnetics.jp/special/kyojiba/history/kyojiba_045/	磁気科学におけるコロイド・界面化学	尾関寿美男（信州大）
第 46 回強磁場応用専門研究会 2018 年 3 月 12 日 13 時半～15 時半 (京都大学 吉田キャンパス 総合研究 11 号館) 共催：低温工学・超電導学会「2017 年度第 4 回 磁場の多様性と利活用に関する調査研究会」，応用物理学会「磁気科学研究会」 https://www.magnetics.jp/special/kyojiba/history/kyojiba_046/	マルテンサイト変態の核生成に関する一考察	掛下知行（阪大）

初めての国際会議に参加して

信州大学 鈴木駿一郎

出発前夜に季節外れの大型台風が直撃し、空港に向かうのにも一苦労したことは忘れられない思い出です。国際会議に発表者として参加するのは今回が初めてでした。ポスター発表も初めてで、ポスター作りから英語での発表練習と四苦八苦していたことが昨日のここのようです。発表は予想外にたくさんの方々が見に来て下さり、拙い英語ながらも活発に議論が出来、有意義な時間を過ごすことが出来ました。また、磁場と言う共通点を持ちながらも様々な分野の研究者が集うこの会議で、新たな視点からの考え方や知識を吸収することが出来たと思います。基本的に全てが英語で進められる中、やはり痛感したのが自分の英語力の無さでした。英語が出来ただけで議論することの出来る人の幅がこんなにも広がることを知ったこの会議での経験は、自分にとって非常に大きな影響をもたらし、英語を学ぶというよりコミュニケーションツールとして英語を話せるようになりたいと強く思うようになりました。

会議では日本の先生方をはじめ、学生も多く各所で大変お世話になりました。このような機会に交流を深めることが出来、学生同士で仲良くなれたことは非常にありがたいことであり、今後の研究活動においてもお互いに刺激し合える関係作りが出来たと感じました。

開催地であるフランス・ランスはシャンパーニュ地方に位置し、シャンパンの産地でもありました。私自身お酒は強くは無いですが、本場の美味しいシャンパンを連日連夜飲み続けたことは一生の思い出です。Excursion でもシャンパンにまつわる場所を案内してもらい、その生産規模の大きさにただただ驚かされました。まさかその後の Banquet でシャンパンを頂けるとは知らず、シャンパンを買っていた人も少なくなかったと思います。また宿泊先のホテルが大聖堂の目の前という好立地であり、昼間には荘厳な彫刻美を、夜にはライトアップされた別の顔をそれぞれ楽しめたのも非常に良い思い出と成りました。

会議が終わった後は、フランスに来たということで前々からお願いをして Eric Beaugnon さんにグルノーブルの強磁場研究所を案内して頂きました。普段使っている大学の施設や装置とは異なり、大規模で洗練された研究所を見学することができたことは本当に刺激になり、研究に対するモチベーションが高まったと同時に、研究することはこのような研究者とも競争しなければならないという焦りにも似た不安を抱いたことも事実です。今回は尾関先生や浜崎先生をはじめ様々な人の理解と協力があって、国際会議への参加と施設見学を含め観光等も行くことが出来ました。ここで経験したことは一生ものであり、研究を今後進めていくうえで非常に刺激になりました。次回の ICMS にも参加するためにもこれからの研究にも邁進したいと思います。



会場にて

国際会議 MAP8(Grenoble France)参加報告

(株) アイシン・コスモス研究所 牛島 栄造

8th International Workshop on Analysis and Processing in Magnetic Fields(MAP8)が2018年6月26日(火)から29日(金)の日程で、フランス、グルノーブルのCNRS-LNCMIで開催された。本国際会議は隔年で開催されており、2004年にTallahassee(USA)で第1回が始まり、今回は8回目である。筆者は2014年Okinawa(Japan)、2016年Providence(USA)に引き続き、参加させて頂いた。

今回の会議での発表件数は34件(口頭24件、ポスター10件)におよび、特に開催地が欧州にもかかわらず、日本からの発表件数は16件と最も多く、この分野での日本の精力的な活動がうかがい知れる。発表内容については装置開発、材料プロセス、物質分離・操作などの近年の研究開発状況を視聴することができ、知見を広げることができた。しかし、発表内容の多くは基礎研究であり、応用研究は筆者も含めて数件しかなく、また、民間からの参加は筆者のみであった。今後は実用化に重きを置いた発表と企業人が増えることを期待したい。

エキスカージョンではグルノーブル美術館を訪れた。古典から現代までの品ぞろえが豊富であり教養を深められた。また、パンケットはユニークなケーブルカーで登れるバステューユ城砦にあるお店のオープンテラスで開催された。南欧の夜景を眺めつつ、フランス料理を堪能し、国際交流を深める良い機会となった。最後に、他国の国研(CNRS-LNCMI)を訪問し、施設見学をすることは極まれであるので、貴重な体験であった。Ericさんに感謝したい。次回のMAP9はKyoto(Japan)の予定であるとアナウンスされた。多くの参加者と交流できることを楽しみにしている。



CNRS-LNCMI 正門前で記念撮影



ケーブルカーとグルノーブルの町並み&
アルプス山脈

第 13 回日本磁気科学会年会開催案内

実行委員長(東北大学) 淡路 智

第 13 回日本磁気科学会年会は、以下の通り東北大学金属材料研究所（片平キャンパス）で開催されます。東北大金研は 2016 年に創立 100 周年を記念して講堂とラウンジをリニューアルし、講堂は大きく近代的になるとともに隣接したラウンジスペースができました。これによりポスターやパーティー会場が確保でき、講演会なども快適にできる様になりました。今回はこの場所を使って年会を開催します。以下に年会の概要を示します。

第 13 回日本磁気科学会年会

会期：平成 30 年 11 月 12 日（月）12 時 30 分～14 日（水）12 時

会場：東北大学 金属材料研究所 2 号館講堂・ラウンジ

（仙台市青葉区片平 2-1-1 東北大学 片平キャンパス）

今回、講演申し込みは 56 件あり、そのうち口頭講演 21 件、ポスター講演 35 件となりました。講演申し込みは 10 日間延長しましたが、当初の〆切時点ですでに 50 件の申し込みがあり、その後の延長で 6 件のポスター発表の申し込みありました。例年と同様、11 月 12 日（月）午後から 14 日（水）午前までの 3 日間、シングルセッションでの開催となります。

企画としては、例年通り、優秀学術賞と功労賞を、中日の 13 日（火）に企画しています。また、最終日の 10 月 14 日（水）午後には磁場発生分科会（大塚委員長）による第 23 回研究会を企画しています。

会場となる講堂の入口には、1952 年に日本で初めて導入された液化機が展示されていますし、ポスター会場のラウンジ（講堂隣）には金研の成果物が展示されています。また隣の本多記念館 3 階本多資料室には本多光太郎先生関連物が展示されています。会議の合間に是非御覧下さい。仙台市周辺には温泉があり、作並温泉や秋保温泉は日帰り温泉も楽しめますし、紅葉もちょうど良いシーズンです。仙台市内では、牛タンやずんだのほか秋の味覚としてサンマなど海の幸も東北の地酒とともに楽しむことができます。学術的な話に花を咲かせながら夜の仙台を楽しむのも一興です。

最後に、第 13 回年会開催にあたりご尽力頂いた現地実行委員の岩井一彦氏（北海道大学）、押切剛伸氏（山形産技短大）、小野寺礼尚氏（茨城高専）、木村尚次郎（東北大）、高橋弘紀氏（東北大）、武内裕香氏（室蘭工大）、三浦誠氏（北海道能開大）、茂木巖氏（東北大）の皆様に感謝申し上げます。



金属材料研究所本多記念館

日本磁気科学会 2018 年 物理化学分科会 「界面現象や生体に関わる磁気科学」

環境やエネルギー、医療分野などにおける磁気科学は、今後更なる発展が期待されています。またこれらの分野研究では飛躍的な進歩が求められており、基礎的な知見を得る事も含めて 21 世紀における今後の我々の社会発展とも関わる重要事項と考えられます。2018 年の日本磁気科学会物理化学分科会では上記も踏まえ、界面現象や生体に関わる磁場効果に関して、4 名の演者にご講演頂く事となりました。皆様には活発なご議論をお願い申し上げます。(講演会後の懇親会にも是非ご参加下さい。)

記

主催： 日本磁気科学会

共催： 応用物理学会 磁気科学研究会

日時： 2018 年 9 月 1 日 (土) 13 : 00 ~ 17 : 00

場所： 京都大学吉田キャンパス 国際科学イノベーション棟

(〒606-8501 京都市左京区吉田本町) <https://web.kyodaimap.net/building/527/>

テーマ： 界面現象や生体に関わる磁気科学

プログラム

13 : 05 はじめに

奥村英之 (京都大学)

13 : 10 ~ 14 : 00 「ポルフィリン化合物の光磁気化学」

石井和之 (東京大学)

14 : 00 ~ 14 : 50 「界面が介在する磁気現象—吸着, 反応, 晶出」

尾関寿美男 (信州大学)

休憩

15 : 10 ~ 16 : 00 「ナノ粒子ならびにソフトマターの磁場特性を活用した

生体分子の分離法」

岡本行広 (大阪大学)

16 : 00 ~ 16 : 50 「生体系を取り巻く多様な条件を磁場効果観測に生かす」

岩坂正和 (広島大学)

17 : 00 閉会

=====

懇親会： 17 時過ぎ頃より (南禅寺『順正』にて)

申込先： 奥村英之 (京大) okumura@energy.kyoto-u.ac.jp

当日参加も受け付けますが、会場・懇親会の準備の都合がありますので、8 月 25 日 (土) までにお申込み頂ければ大変助かります。

日本磁気科学会 2018 年 磁場発生分科会

「磁場発生技術の最前線」

近年磁石の開発が進展するとともに、様々な磁場発生技術が新たな展開を見せています。ネオジム磁石、高温超伝導バルク磁石、高温超伝導 NMR 磁石、液体窒素冷却高温超伝導磁石など、磁場発生技術の新たな進展とその応用についての研究会を企画しました。磁気科学関連研究・技術は磁場発生技術の進展とともにあると言っても過言ではありません。磁場発生技術の進展に大きく貢献されている 4 名の方にお越しいただき、最先端の様々な磁場発生技術とその応用に関する話題が提供されます。奮ってご参集ください。磁場を利用した研究に新たな展開をもたらすことが期待できると思います。

日時：2018 年 11 月 14（水）13:20-16:20

会場：東北大学 金属材料研究所 2 号館講堂

（仙台市青葉区片平 2-1-1 東北大学 片平キャンパス）

プログラム

13:20-13:25 はじめに 大塚秀幸 NIMS

13:25-14:05 最新のネオジム磁石の技術動向と磁石応用例 山本日登志 (株) KRI

14:05-14:45 超電導バルク磁石の強磁場発生と補強の重要性 藤代博之 岩手大

休憩

15:00-15:40 液体窒素 RE-Ba-Cu-O 超伝導コイルの NMR 応用可能性 西島元 NIMS

15:40-16:20 HTS-NMR システムに向けた LTS/HTS 磁石開発 松本真治 NIMS

16:20 閉会

速報、ICMS2019 開催日程決定！ 2019 年 10 月 7－11 日

物材機構 廣田 憲之

International Conference on Magneto-Science 2019は、中国科学院 合肥物質科学研究院 強磁場科学中心のProf. Xin Zhang がチェアを務められ、2019年10月7日(月)から11日(金)までの日程で中国・Hefei (合肥)において開催されることとなりました。

多くの方がご存知と思いますが、2年に一度開催される磁気科学分野最大のこの国際会議のルーツは日本にあります。2005年に山口益弘先生が横浜で開催されたInternational Symposium on Magneto- Scienceを起源とし、2007年に広島で開催された会議で現在の名称へ変更、この時に谷本能文先生をチェアとするInternational Organizing Committeeが組織されたことにより隔年で継続的に開催することになりました。その後、2009年 Nijmegen、2011年 上海・西安、2013年Bordeaux、2015年松本、2017年はReimsで開催されてきましたが、2019年は8年ぶりに中国での開催となります。

開催地のHefei (合肥)は、安徽省の省都で、その歴史は非常に古く、紀元前3世紀の秦の時代には既に県がおかれており、後漢から三国時代にかけて曹操と孫権の係争地となったことでも有名です。また、日本の久留米市とは姉妹都市だそうです。近年、中国科学院が40 T級のハイブリッドマグネットを中心とする強磁場施設を整備しており、今後、磁気科学分野の研究も盛んになると見込まれます。

ぜひこの機会に、歴史と科学の街Hefeiで世界の磁気科学研究者と交流を深め、最新の情報を収集しませんか？

ホームページが開設されましたら、会員メーリングリストでお知らせします。

強磁場科学の世界を仲間と楽しんで

鹿児島大学 小山佳一

この度は、第7回優秀学術賞を受賞し、大変光栄に存じます。日本磁気科学会の会員各位、共同研究者の皆様に心よりお礼申し上げます。私の受賞理由は「磁場による強磁性物質の機能性と平衡状態図の制御に関する研究」です。この研究が今日まで発展できたのは日本磁気科学会と多くの会員の皆様との議論、交流の賜物と感じています。

受賞理由の一つは強磁場 X 線回折測定に関係していると思います。2001 年に私が着任した東北大金研強磁場センターには、渡辺和雄先生が開発した 5T 強磁場低温 X 線回折装置があり、磁場で磁気・結晶一次相転移を利用する機能性材料の結晶特性評価に「面白い」とビビッと感じました。2003 年から系統的に実験を進め、私たちグループでこれまでに 54 本の論文にまとめることができました。特に、磁場誘起逆マルテンサイト変態の X 線その場評価に成功、2006 年第1回磁気科学会で報告しました。現在鹿児島大学で准教授をしている三井好古氏が学生として研究に加わり、強磁場 X 線装置用高温炉開発(第2、3回磁気科学会報告)、100mm ボアマグネット用強磁場 X 線粉末小型カメラの開発(第3回磁気科学会報告)と進めてきました。高温装置開発前には名大浅井研の強磁場 X 線装置も見学させていただき、参考になりました。

もう一つは強磁性物質の平衡状態図の磁場制御です。室温以下の低温にちょっと飽きてきた 2006 年ごろ、360℃付近で強磁性-常磁性の磁気一次相転移を示す Mn-Bi と、その包晶反応をもつ平衡状態図に「面白い」と感じました。淡路氏らが開発した 50 mm ボア用磁場中熱分析装置と強磁場センターの 15T 無冷媒超伝導マグネットを使って、Mn-Bi の包晶反応温度が磁場によって 2K/T の割合で制御でき、「45T あれば Mn+液相から即強磁性ができる」と第1回磁気科学会で発表しました。横浜国大の山口先生から「タラハシーでのいい実験テーマですね」とお言葉をいただいたことを覚えております。それから早速、30mm ボアのハイブリッドマグネット用強磁場中熱分析装置を製作し、タラハシーでの実験準備をしました。

2009 年秋の約2週間、実験装置を米国タラハシーの強磁場施設に持ち込み、三井氏と 45T-500℃の熱分析に成功、磁場で Mn-Bi 合成・分解制御を実証しました。さらに、Mn-Bi 系、Fe-C 系の磁場中平衡状態図を実験的に解明でき、また実験結果をよく再現する磁場中平衡状態図の計算手法も開発できました(第5、6回磁気科学会報告)。三井氏との共同研究では、Mn 粉体と Bi 粉体を用いた強磁場合成で磁場反応焼結促進効果を見出すとともに、新しい強磁性材料合成プロセスを提案できました(第8、9回磁気科学会報告)。最近では、Mn-Al 系で、強磁場相変態促進効果も見出し(第11回磁気科学会報告)、ますます強磁場物質科学が「面白く」なってきました。

今、鹿児島大学小山・三井研究室の強磁場磁気科学研究は新しいフェーズに入ってきたと感じています。5T ですが、いつでも使える無冷媒超伝導マグネットも導入されました。三井氏や学生らの活躍で、強磁場中急冷炉など新しい磁場中合成装置も製作され、「面白い」磁場効果も続々と見出されております。今回の受賞を励みに、磁気科学会の発展に貢献できるよう研究を進めていきますので、今後ともご指導のほど、よろしくお願い申し上げます。

無冷媒超伝導マグネットの実用化と強磁場化

東北大学名誉教授 渡邊和雄

0.5W の冷凍能力が精一杯の小型冷凍機で超伝導マグネットを冷却するには、銅製の電流リードからの熱侵入があるためにマグネット運転電流が 40A で限界でした。コンパクトな超伝導マグネットを設計するには小さすぎる運転電流であったので、実用化のために銅製電流リードもさらに別の冷凍機で冷却することで運転電流が 100A 程度まで可能な超伝導マグネットの開発研究も行われていました。このような状況の中で、私は高温超伝導体が従来型の超伝導体と比較しても遜色ない臨界電流特性を持つこと及び高温超伝導バルク材の熱伝導がステンレス鋼並みに小さいことに着目しました。Bi2223 バルク高温超伝導電流リードを用いることにより、超伝導マグネット装置への電流リードからの熱侵入をこれまでの銅製電流リードに比べて 1/10 にまで小さくできました。その結果、超伝導マグネット冷却用の 0.5W 冷凍能力 GM 冷凍機を 1 台だけ用いて、運転電流 500A まで通電できる世界で初めて実用的な 4T 無冷媒超伝導マグネットの開発に成功し、1 ヶ月の連続運転を実証しました。この成功を発端として、無冷媒超伝導マグネットは産業化され大発展をすることになりました。さらに私は、無冷媒超伝導マグネットに最適な高強度 Nb₃Sn 線材の開発研究を行い、強磁場用の無冷媒超伝導マグネットに適用させました。最近では、世界最高の 24.6T の強磁場発生無冷媒超伝導マグネットの開発や無冷媒超伝導マグネットと水冷マグネットを組み合わせた世界唯一の 28.1T 無冷媒ハイブリッドマグネットの開発に成功しています。

近年、米国及び欧州では精密な定常強磁場を用いた中性子散乱実験が重要視されています。特に、2013 年ドイツ・ベルリンにて 4MW で 26T 発生用のハイブリッドマグネットを中性子散乱用として米国と共同で建設が始められました。しかし、水冷マグネットの大きな維持費に問題があるとして 2019 年までに中止されることになりました。わが国では、J-PARC に設置されている 14T 超伝導マグネットが最強磁場であり、これ以上の強磁場と組み合わせる中性子散乱の計画は立案されていませんが、私の開発研究によってスプリット型 25T 無冷媒超伝導マグネットの実現が十分な射程に入っています。有機化学など多くの研究分野において結晶の大型化は非常に困難ですが、最近の磁気科学分野の研究では、強磁場中での非調和回転運動によって結晶軸を 3 軸とも配向できることが示されてきました。したがって、微結晶を用いて 20mm 径ほどの 3 軸磁場配向の擬似単結晶が実現すれば、基礎物性分野では通常では作製できない独創的な大型擬似単結晶を用いた世界で初めての強磁場中性子散乱実験が可能になります。また、応用研究ではタンパク質の構造と機能の関係が解明され、さらに創薬や酵素の高機能化へと発展すれば、社会に与えるインパクトは計り知れません。

米国と欧州の共同建設が途中で断念せざるを得ないほどの定常強磁場中性子散乱実験プロジェクトは、わが国の無冷媒超伝導技術を用いれば実現可能となるように思います。磁気科学に結び付いた定常強磁場中性子散乱実験がわが国で花開くことを祈念します。

‘Magnetoscience’ in high magnetic fields

J.C. Maan

High Field Magnet Laboratory (HFML-EMFL), Institute for Molecules and Materials, Radboud University, Nijmegen, The Netherlands

ABSTRACT

High magnetic fields can be used to study and to order molecular, ‘non magnetic’ matter. The weak diamagnetic forces at high fields are sufficient to levitate objects by the compensation of gravity and to align clusters of diamagnetically anisotropic molecules (typically with about 10^5 molecules). The basic physics is explained and several examples of the use of levitation and alignment are given. This paper reviews the work that has been done in Nijmegen in the field of magnetoscience in the past twenty years.

I Introduction

The term magnetoscience is mostly used for the study of (mainly soft) matter with the use of magnetic fields and where the field does not only serve as a spectroscopic tool as is usually the case. In this more common application of magnetic fields in materials research the electronic and magnetic state inside the materials is changed by the magnetic field and material parameters are determined by observing these changes. For instance the Fermi surface, bandstructure, and the effective mass in metals and semiconductors are determined from magnetoquantum oscillations in the magnetization (the de Haas van Alphen effect) or the resistance (Shubnikov de Haas effects). Instead in magnetoscience the magnetic field acts as an agent that changes the object under study itself. Mostly organic, non magnetic' matter is studied often near a phase transition, i.e. during crystal growth or aggregation of molecular clusters from the solution. The magnetic field is used to influence the structure formation or to measure the degree of ordering that has been brought about.

The highest man-made continuous magnetic field is 45T with a hybrid magnet (a combination of a superconducting outer magnet with a resistive inner one) while with purely resistive magnet almost 40T can be reached. Such high fields are only available in a few specialized laboratories in the world (Tallahassee, Grenoble, Hefei and Nijmegen). As an extra benefit, these high magnetic fields with resistive magnets standard have a room temperature bore of typically 32 mm which them ideally suited for magnetoscience experiments which are mostly done near room temperature and which often involve liquids as a medium where growth takes place. Furthermore the available space allows in situ optical probing of the material studied.

In this paper I will describe the basic physics of magnetoscience and provide an overview of several experiments that we have performed in the past decades in the HFML in Nijmegen. We will cover several aspects of magnetoscience i.e. alignment of molecular matter, levitation and crystal growth under field induced microgravity and influencing chirality. Very useful reviews can be found in refs .[1] and [2]

Underlying all magnetoscience applications is the basic physics of the interaction of matter with magnetic fields. The thermodynamic free energy $U = \underline{M} \cdot \underline{B}$ where $\underline{M}$ is the magnetization is given by

$$\underline{M}(\underline{B}) = \frac{\partial E(\underline{B})}{\partial \underline{B}}$$

How the energy of matter E depends on the magnetic field $\underline{B}$ depends of course on the details of the system but to explain the basic physics we consider matter as an ensemble of hydrogenic atoms. This is of course only true for hydrogen itself but in the beginning of the periodic system (the first two rows) elements still may be considered hydrogenic. In the first row hydrogen and He behave similar albeit with different energies due to the different nuclear charge. The second row may again be described similar to hydrogen, where one considers Li with its full 1s orbits with two electrons that shield +2e nuclear charge making that the remaining electron again moves in a $1/r$ like potential with a +e charge, very much like hydrogen.

Hydrogenic states in a magnetic field are described by

$$H\Psi = \left[\frac{(\underline{p} - e\underline{A})^2}{2m} + V(r) \right] \Psi$$

With $\underline{A}$ the vector potential containing the magnetic field and $V(r)$ the central potential. Considering the magnetic field as a perturbation on the hydrogenic states the first order energies are given by

$$E_{L,S,n}(B(z)) = E_{L,S,n} + \mu_B \langle \Psi_{L,S,n} | (\underline{L} + g \underline{S}) \cdot \underline{B} | \Psi_{L,S,n} \rangle + \frac{e^2 B^2 \langle \Psi_{L,S,n} | x^2 + y^2 | \Psi_{L,S,n} \rangle}{8m}$$

With

$$\langle \Psi_{L,S,n} | H_0 | \Psi_{L,S,n} \rangle = E_{L,S,n}$$

the unperturbed (zero field) energies, i.e. the standard Rydberg energies, L, S and n are the usual quantum number for the orbital momentum, the spin and the Rydberg states. The last two terms describe the effect of the magnetic field. The first term containing L and S describes the lifting of the orbital (L) and the spin (S) degeneracy of the ground state leading to states at lower energy for one direction of the angular momentum and higher energy for the opposite direction. This effect lowers the ground state energy for all systems with an unpaired number of electrons since these can occupy the lower lying states. This term is responsible for what is usually known as magnetism. Since the dE/dB is negative (energy is lower in magnetic fields) M is also negative and therefore the free energy U of the systems decreases with increasing field. Most magnetic phenomena commonly known like e.g. ferro magnets are caused by this contribution. The Zeeman splitting is of the order 0.1 meV/T

The second term describes diamagnetism and is caused by the deformation of the atomic orbits by the magnetic field. Diamagnetism leads to an increase in the free energy U, since dE/dB is positive, as is the induced magnetization M. The typical energies for diamagnetism is of the order of $\mu\text{eV/T}$, many orders of magnitude weaker than the Zeeman term. However it does not require an unpaired number of electrons and is relevant for all elements. Magnetoscience mostly exploits this less familiar diamagnetism.

Diamagnetism is used in magnetoscience in two ways; i) to levitate matter in magnetic fields creating pseudo microgravity and ii) to align molecular matter.

II Levitation

Since the free energy in diamagnetic material increases with increasing magnetic field, it is energetically favorable for such material to move to the low magnetic field region (low field seeking). The force pushing to lower field is $F = dU/dx$. If an object is placed from the top in a magnet with a vertical bore, gravity will pull it down to the high field region, while the diamagnetic force pushes it away from it. If gravity is canceled by the diamagnetic force the object levitates. The levitation condition is:

$$\frac{F}{\rho} = \frac{dU}{\rho dx} = - \frac{M}{\rho} \frac{dB}{dx} = - \frac{\chi}{\rho \mu_0} B \frac{dB}{dx} \Big|_g$$

Where χ is the susceptibility ($\chi = \mu_0 \underline{M} / \underline{H}$), ρ density of the matter, dB/dx the magnetic field gradient and g the gravitational acceleration. For water $\chi = 0.9 \cdot 10^{-5}$ and for a typical magnet dB/dx is about 1T/m and one needs 16T to meet the levitation condition which in this case is 1200 T²/m. Interestingly enough the ratio χ / ρ is very similar for most organic matter, making that the levitation condition almost identical for different molecules. The origin of this similarity is directly related to the cause of diamagnetism. Going up in the periodic system from water to C, N etc. the number of electrons in orbits increases and each electron contributes more or less equal to the susceptibility. However at the same time, the atomic mass increases also and as long as the average distance between atoms in organic matter remains comparable, the increase in density of the material follows the nuclear mass and therefore the ratio density/diamagnetism remains about the same. Further down the periodic system this argument breaks down because the deeper lying electronic orbits are so strongly bound that the magnetic field cannot deform them appreciably. A second important observation is that since the levitation condition depends on the ratio χ / ρ and that the total volume of the object is irrelevant. I.e. it requires the same magnetic field to levitate a big or a small object. The only practical boundary is that a big object requires a big magnet which makes it costly. In principle one could levitate a human being with the same levitation condition as a water drop, but the huge magnet needed requiring at least a 50 cm bore would make this immensely expensive.

Magnetic levitation is already known for a long time. The earlier reports describe the levitation of a strongly diamagnetic substance like graphite that require lower magnetic fields [3]. In the eighties the advent of strong (hybrid) magnets made levitation of many more organic objects possible as reported in [4]. In the late nineties Andrey Geim (the later Nobel prize winner for his work on graphene) showed in Nijmegen that a living creature, a frog, could be levitated [5]. This, from a physics point of view, is not a very new observation but it attracted great popular attention and the frog pictures and movies were shown on major TV channels like BBC and CNN, while the webpage at the Nijmegen magnet lab attracted over a million visitors in 1998, which at that pre-youtube time was exceptional. Geim was awarded the Ig Nobel prize for the flying frog in 2000. The IgNobel is an amusing prize for “the most irrelevant but funny science”. Together with Michael Berry, Geim published a paper [6] which carefully studied the conditions for stable levitation. Stability not only requires the compensation of gravity with the upward diamagnetic force, it also requires that this occurs in a magnetic field profile in which the radial field away from the axis increases to push the levitating object away from the wall towards the center of the magnet bore. In fact because of its negative sign magnetic levitation escapes the Earnshaw theorem which states that it is impossible to stabilize in three dimensions anything with only electrostatic charges or magnetic dipoles. [6]

The flying frog and other magnetoscience experiments in Nijmegen were born out of necessity. The old Nijmegen magnet lab (the precursor of the present HFML [7]) had an old 5MW DC installation that could power a few 20T magnets and a 30T hybrid. At that time (the mid nineties) 20T superconducting magnets were commercially available and such fields did not require expensive DC power supplies with cooling plants. Renewed magnet labs like the LNCMI in Grenoble (France) and especially the newly created NHMFL in Tallahassee, which possessed 24MW+ power supplies could generate 30T purely resistive and Tallahassee was commissioning a 45T hybrid. Therefore standard low T experiments (the de Haas van Alphen effect, Shubnikov de Haas effect, Quantum Hall effect) which interested many solid state scientist could be done up to 20T in their home laboratories while experiments requiring higher fields were done in the modern high field laboratories. However 20T at

room temperature was unique and this 'magnetoscience niche' was not very much exploited. The flying frog was the first results we obtained entering this field.

Magnetic levitation is often associated with simulated microgravity. There are, as discussed later, important differences but nevertheless this similarity made us look to experiments done in space that could be done in magnetically simulated microgravity. An obvious candidate is of course crystal growth in microgravity.

Crystal growth, in particular organic crystals, often takes place in a saturated solution, where small crystallites are formed which grow as atoms or molecules are deposited on the surface. Therefore the boundary layer near the forming crystal surface (the depletion zone) is partially depleted which makes it lighter than the saturated solution further away from the surface. The lighter liquid rises up through buoyancy (the growth plume) and the depletion zone is refreshed with new saturated solution flowing towards the surface of the growing crystal. Therefore crystal growth under gravity is accompanied by liquid flow. This flow is detrimental to the crystal quality for two reasons. i) The crystal grows too fast, giving deposited matter not enough time to move along the surface to find the ideal position to bind definitely and ii) the circulation fluid motion also carries impurities to the forming surface which are built in. In space, under microgravity, the density difference does not lead to any motion and the depletion zone develops around the crystal slowing down growth and preventing the inclusion of impurities.

The apparent weightless conditions in space microgravity is caused by the fact that all matter, irrespective of its mass, is free falling at the same velocity. Therefore the crystal growth plume disappears. Magnetic levitation is different from true microgravity because it is caused by a perfect balance of forces, i.e. gravity is compensated by diamagnetic expulsion of the magnetic field. In order to suppress the growth plume in crystal growth it is therefore necessary to balance the downward forces and the upward forces in the depleted, index 1 (near the surface) and the dense, index 2, phase simultaneously [8]. I.e.,

$$B(z)B'(z) = \frac{\Delta\rho}{\Delta\chi} \mu_0 g \quad \text{With} \quad \Delta\rho = \rho_2 - \rho_1 \quad \Delta\chi = \chi_2 - \chi_1$$

This condition is very different from the simple levitation condition and leads to very different field values compared to what is needed for simple levitation.

We studied with in situ Schlieren and contrast microscopy the growth of nickel sulfate hexahydrate from solution [9]. This material was chosen because the differences $\Delta\rho$ and $\Delta\chi$ between the solid grown crystal and the saturated liquid leads to a condition for the plume suppression of $39\text{T}^2/\text{m}$ allowing a study at relatively low fields. As pointed out earlier, this number is much lower than the $1200\text{T}^2/\text{m}$ needed for levitation. A careful study and analysis [10,11] of the growth in magnetic field simulated microgravity shows that the effective gravity, which is zero at the plume suppression field B_s , scales with $(B-B_s)^4$ which makes that the field must be chosen quite precisely. The interest in making perfect single crystals under microgravity lies above all in the growth single crystals of proteins that are needed for structure determination and that is of great interest to the pharmaceutical industry. We therefore showed that magnetic field simulated microgravity can also be used for proteins and we demonstrated this with egg white lysozyme [12] which is found to need

4600T²/ m to suppress the growth plume. This condition that can only be met in very high magnetic fields.

III Magnetic alignment

An isotropic object (molecule, nanocrystal,...) with a susceptibility per molecule χ in a magnetic field acquires an extra energy U

$$U = - \begin{pmatrix} \chi_{\parallel} & & \\ & \chi_{\perp} & \\ & & \chi_{\perp} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_x & B_y & B_z \end{pmatrix} = -[\chi_{\parallel} B_x^2 + \chi_{\perp} (B_y^2 + B_z^2)]$$

Where χ is negative for a diamagnet. If $\chi_{\parallel} \gg \chi_{\perp}$ it is energetically favourable for the molecule to align perpendicular to the magnetic field. Therefore molecules with an anisotropic susceptibility will align in a magnetic field along the axis with the smallest susceptibility. For instance a benzene molecule which consists of 6 C atoms in a hexagon, will preferably align with its plane parallel to the magnetic field because in that case the induced diamagnetic moment is much smaller than in the perpendicular direction. However, for a single molecule this effect is very weak because diamagnetism is very weak. For instance the benzene molecule has an anisotropy $\Delta\chi = -60 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{mol}$ giving rise to an energy difference between the two orientations of the molecule in a magnetic field of $\Delta U = \Delta\chi B^2 / \mu_0$ which corresponds to 10^{-5} kT at 300K and at 20T. I.e. the energy gain by aligning even at these high fields is negligible for a single molecule. However, a cluster of, for instance, 10^5 benzene molecules or larger will align. Such a cluster corresponds to a microcrystallite of about 3nm. I.e. only larger (but still nm sized objects) ordered aggregates of molecular material with a significant anisotropy will align in attainable magnetic fields. The degree of alignment is determined by the Boltzmann factor $e^{-N\Delta U/kT}$, where ΔU the field induced energy gain per molecule and N the number of molecules per cluster.

To measure the degree of alignment of the aggregates in solution we can either measure the change of the real part of the dielectric constant (field induced birefringence) or the change in the imaginary part (absorption, or field induced dichroism). The latter contribution is only measurable in the vicinity of an optical absorption band. In the following we will review a few examples of the use of magnetic field induces alignment either as a useful characterization technique or as a way to produce ordered materials.

Molecules in a solid under the right conditions (temperature or concentration) can form clusters. These clusters are made from a particular way of stacking of the constituent materials. For instance in the form of rods (all molecules stacked on top of each other) with the molecules having a specific orientation with respect to the rod axis. Also more complicated stacking like the herringbone structure where adjacent stacks of molecules have alternate angles (as with a herringbone). The optical anisotropy is determined by the polarization of the light with respect to the angle of the molecule. In a magnetic field the orientation of the molecules with the magnetic field determines the alignment and if the clusters are large enough and the field high enough, studying the optical activity (dichroism or birefringence) with different light polarizations provides information of the internal

structure of the clusters. This technique was exploited to study dye aggregates [13] made from different dye molecules or supramolecular aggregates [14, 15].

Maybe even more interesting is the creation of ordered materials. A saturated solution under conditions where aggregation does not yet take place (above a transition temperature for instance) is placed in a high magnetic field. The aggregation process is initiated, for instance by lowering the temperature or by adding a chemical agent stimulating cluster formation, and clusters start to form. When they have grown in size sufficiently they can align in the magnetic field and as they grow even more they will merge together forming an ordered crystalline state. We used this technique to create ordered polymer liquid crystals [16] or gels [17,18], study domain dynamics in CB8 liquid crystals [19] and create ordered conducting polymers from coronene molecules [20]. In the latter case we have shown that in the ordered phase the mobility in the conducting polymers is about two orders of magnitude higher than in the disordered phase.

We also used magnetic alignment to study deformation of nm sized molecular structures. A special rod like molecule (6T, sexithiophene) with a hydrophobic central part and hydrophilic tails on both ends, aggregates in a watery liquid in the form of hollow spheres. In the aggregation the molecules initially form sheets with all the hydrophobic parts sticking together to avoid contact with water and eventually these sheets fold into spheres, minimizing the energy by making that all the hydrophobic parts are now not in contact with water. In these spheres all molecules are oriented pointing towards the center of the sphere. In a magnetic field the molecular rods of the individual molecules want to align along the magnetic field. The rods on the top of the bottom of the sphere already have this orientation but the ones on the equator are in very unfavourable orientation. The only way to decrease their energy is by deforming the sphere into an oblate ellipsoid [21]. This way the magnetic energy is put in competition with the elastic energy in the 100nm sphere and by measuring the deformation optically this elastic energy can be determined [22]. Subsequently we exploited this technique even further with larger supramolecular vesicles. The vesicles are hollow molecular structures made from stacked lysozyme molecules [23]. They are much larger than the hollow 6T structures discussed previously and at a certain size these spheres, which are very flexible and stretchable, collapse into a flat double walled pancake which in turn can fold into an incomplete sphere, i.e. with an opening resulting from the folding of the double wall. These spherical objects with an opening are called stomocytes and we have shown that with a magnetic field on or off, one can open and close the hole. The stomocyte can capture a small marker molecule that is in the liquid when it is opened with the magnetic field on and trapped with the field off. Reapplying the field later or in another environment one can liberate the molecule trapped inside. With suitable marker molecules we have shown that this technique works thus demonstrating a possible way of magnetic field controlled drug delivery. [23]

IV Controlling chirality

Many molecular structures have chiral properties. The word chiral comes from the greek word *Χειρ* for hand and describes a symmetry property where two objects are each other's mirror image but where it is impossible to transform one in the other by rotations and translations only. Objects showing this symmetry property are called chiral. A pair of hands is a clear example of two chiral objects with left and right symmetry. Many molecules or molecular structures have this symmetry and it is very difficult to find a way in which only one species with the same handedness is

made because thermodynamically (energy and entropy) both enantiomers are completely equivalent. However the handedness of a molecule is not only of pure academic interest since the different enantiomers can have very different physiological effects. For instance as a left handed molecule aspartan is a sweetener while the right handed version is bitter, left handed citric acid tastes like lemon and the right handed version is poisonous, and a very dramatic example is the drug thalidomide (softenon) which in the left version is a sedative while the right version causes foetal anomalies. It is therefore important to steer or control handedness of molecules. Molecules in life like DNA, the carrier of genetic properties, also have one well defined chirality and as yet there are no explanations why this particular chiral direction has evolved.

Chirality is easily associated with magnetic fields since the Lorentz force on charged particles in a magnetic field leads to a circular motion and consequently optical properties in magnetic field depend on the circular polarization (left or right circular) of the light. Nevertheless a magnetic field alone is not chiral since the left and right circulating carriers can be transformed into each other by a $\pi/2$ rotation and/or time reversal. The combination of magnetic fields with other vectors like a rotation axis or gravity may be chiral.

We investigated field induced chirality in an experiment where phtalocyanine molecules stack on to of each other. These molecules can be approximated as square platelets with identical end groups on three corners and a different group on the fourth. When they stack together this asymmetry makes that they stack in either left or right rotating piles. Under normal conditions the aggregates formed will be half left and half right chirality. The degree of chirality can be measured by circular dischroism (CD) which is zero when the system is not chiral because both enatiomers are present in equal amounts. When one enatiomer is more abundant CD shows a signal.

In the experiment we mounted seven identical cilindrical containers attached on top of each other to a rotating rod inside the magnet. When the field increases the container in the center feels a high field but normal gravity since there is no magnetic field gradient in the center. Containers higher on the axis feel a reduced gravity because the field gradient pushes the liquid against gravity, while container below the field center feel an enhanced gravity since the field gradient is oriented in the other direction. We rotated the container with the liquid for fifteen minutes in the magnetic field after introducing a clustering agents which triggers the formation of stacks from the individual molecules. After these fifteen minutes the containers are left (under controlled temperature and light conditions) alone for three day after which the circular dichroism was measured. The experiment was repeated with several different rotation frequencies, magnetic field direction and value and all experiments showed that there is a unique combination of the direction of effective gravity and the rotation that always (100%) produces one sign of circular dischroism. Without a field, but with rotation alone no chirality was observed. This experiment shows for the first time that we can use magnetic fields to steer chirality of the selfassembly by external forces, This experiment may help to understand the formation of chiral systems and possibly may help to provide insight into the origin of the chirality of life.

V Conclusions and acknowledgement

Diamagnetism and magnetic forces on 'non magnetic, organic' matter at high continuous magnetic fields can be used to levitate organic matter, simulate microgravity, create ordered structures with favourable optical and electrical properties, study the internal structure of molecular clusters and

steer chirality of self assembled objects. Since diamagnetism in organic matter is relatively weak the effect on individual molecules is negligible but for nm sized clusters it may exceed the thermal energy. Therefore studies are often done near a phase transition where cluster or liquid crystalline states are formed. This paper has demonstrated that despite this smallness magneto science can be used to address a several interesting physical problems and demonstrates the potential useful applications.

This review summarizes the work done at the Nijmegen High Field Magnet Laboratory in the past twenty years together with Peter Christianen. I am very grateful for this pleasant, long standing and successful collaboration. The work reported here was done by the following PhD student Marius Boamfa (2003), Giorgia Tordini (2016), Igor Shklyarevskiy (2005), Maurits Heijna (2008), Paul Poodt (2008), Jeroen Gielen (2010), Peter van Rhee (2015) and Roger Rikken (2016) who all completed their theses at the Radboud University Nijmegen in the year indicated. I want thank the Japanese Magneto Science Society of Japan for awarding me a life time achievement prize for this work.

References

- 1) G. Maret and K. Dransfeld: Topics in Applied Physics, Vol. **57**, 143-204, ed. F. Herlach, Springer Berlin, (1985)
- 2) R.S.M. Rikken, R.J.M. Nolte, J. C. Maan, J.C.M. van Hest, D.A. Wilson and P. C. M. Christianen.: Soft Matter **10**, 1295. (2014),
- 3) W. Braunbeck, Z. Phys. **112**, 735, (1939)
- 4) E. Beaunon, R. Tournier, Nature **349**, **470**, (1991)
- 5) A. Geim, Physics Today **51**, 9, 36 (1998)
- 6) M. V. Berry, A. K. Geim, Eur. J. Phys. **18**, 307 (1997)
- 7) J.A.A.J. Perenboom; S.A.J. Wiegers, P.C.M. Christianen, U. Zeitler; J.C. Maan, J. of Low Temp. Phys. **133**, 181-201, (2003)
- 8) N. Ramachandran and F.W. Lesley, Journal of Crystal Growth, **274**, 297, (2005)
- 9) P.W.G. Poodt, M.C.R. Heijna, P.C.M. Christianen, W.J.P. Enckebort, W.J. de Grip, K. Tsukaoto, J.C. Maan and E. Vlieg, App. Phys. Lett **87**, 214105, (2005), and Crystal Growth and Design **6**, 2276, (2006)
- 10) P.W.G. Poodt, P.C.M. Christianen, W.J.P. van Enckevort, J.C. Maan and E. Vlieg, Crystal Growth and Design , **7**, 2194, (2008)
- 11) P.W.G. Poodt, P.C.M. Christianen, W.J.P. van Enckevort, J.C. Maan and E. Vlieg, Crystal Growth and Design , **7**, 2200 (2008)
- 12) M.C.R. Heijna, P.W.G. Poodt, J.L.A. Hendrix, K. Tsukamoto, P.C.M. Christianen. W.J.P. van Enckevort, W.J. de Grip and E. Vlieg, Appl. Phys. Lett. **90**, 264105, (2007)
- 13) I.O Shklyarevski, E. Aret, H.L.M. Meekes, G. Deroover, P. Callant, E. Vlieg, P.C.M. Christianen, J.C. Maan, J. Phys. Chem **B108**, 16386 (2004)
- 14) J.C. Gielen, I.O. Shklyarevskiy, A.P.H.J. Schenning, P.C.M. Christianen, J.C. Maan, Science and Technology of Advanced Materials **10**, 0124601 (2009)
- 15) M.I. Boamfa, P.C.M. Christianen, H. Engelkamp, R.J.M. Nolte, J.C. Maan, Advance Functional Materials **14**, 261 (2004)
- 16) M.I. Boamfa, K. Viertler, A. Wewerda, F. Stelzer, P.C.M. Christianen, J.C. Maan, Phys. Rev. Lett. **90**, 2, (2003) and Phys. Rev. **E67**, 050701 (2003)
- 17) D.W.P.M. Lowik, I.O. Shklyareckiy, I. Ruizendaal, P.C.M. Christianen, J.C. Maan, J.W. van Hest, Advanced Materials **19**, 1191, (2007)
- 18) I.O. Shklyarevskiy, P. Jonkheijm, P.C.M. Christianen, A.P.H.J. Schenning, A. Del Guerzo, E.W. Meijer, J.C. Maan, Langmuir **21**, 1208, (2005)
- 19) G. Tordini, P.C.M. Christianen, J.C. Maan, Molecular Crystals and Liquid Crystals **435**, 915 (2005)
- 20) I.O. Shklyarevskiy, P. Jonkheijm, N. Stutzmann, D. Wasserberg, H.J. Wondergem, P.C.M. Christianen, A.P.H.J. Schenning, D.M. de Leeuw, Z. Tomovis, J.S. Wu, K. Mullen, J.C. Maan, J. Am. Chem. Soc. **127**, 16233 (2005)
- 21) I.O. Shklyarevskiy, P. Jonkheym, P.C.M. Christianen, A.P.H.J. Schenning, E.W. Meijer, O. Henze, A.F.M. Kilbinger, W.J. Feast, A. Del Guerzo, J.P. Desvergne, J.C. Maan, Am. Chem. Soc. **127**, 1112 (2005)
- 22) O.V. Manyuhina, I.O. Shklyarevskiy, P. Jonkheym, P.C.M. Christianen, A. Fasolino, M. Katsnelson, A.P.H.J. Schenning, E.W. Meijer, O. Henze, A.F.M. Kilbinger, W.J. Feast, A. Del Guerzo, J.P. Desvergne, J.C. Maan, Phys. Rev. Lett. **98**, 146101 (2007)

- 23) P.G.van Rhee, R. S. M. Rikken, L.K.E.A. Abdelmohsen, J. C. Maan, R.J.M.Nolte, J.C.M. van Hest, P.C.M. Christianen, D.A. Wilson, *Nature Commun* **5**, 5010, (2014)
- 24) N. Micali, H, Engelkamp, P.G. van Rhee, P.C.M. Christianen, L.M. Scolaro, L. Monsu, J.C. Maan, J. C., *Nature Chemistry* **4**, 201 (2012)

‘Magnetoscience’ in high magnetic fields

J.C. Maan

High Field Magnet Laboratory (HFML-EMFL), Institute for Molecules and Materials, Radboud University, Nijmegen, The Netherlands

ABSTRACT

High magnetic fields can be used to study and to order molecular, ‘non magnetic’ matter. The weak diamagnetic forces at high fields are sufficient to levitate objects by the compensation of gravity and to align clusters of diamagnetically anisotropic molecules (typically with about 10^5 molecules). The basic physics is explained and several examples of the use of levitation and alignment are given. This paper reviews the work that has been done in Nijmegen in the field of magnetoscience in the past twenty years.

I Introduction

The term magnetoscience is mostly used for the study of (mainly soft) matter with the use of magnetic fields and where the field does not only serve as a spectroscopic tool as is usually the case. In this more common application of magnetic fields in materials research the electronic and magnetic state inside the materials is changed by the magnetic field and material parameters are determined by observing these changes. For instance the Fermi surface, bandstructure, and the effective mass in metals and semiconductors are determined from magnetoquantum oscillations in the magnetization (the de Haas van Alphen effect) or the resistance (Shubnikov de Haas effects). Instead in magnetoscience the magnetic field acts as an agent that changes the object under study itself. Mostly organic, non magnetic matter is studied often near a phase transition, i.e. during crystal growth or aggregation of molecular clusters from the solution. The magnetic field is used to influence the structure formation or to measure the degree of ordering that has been brought about.

The highest man-made continuous magnetic field is 45T with a hybrid magnet (a combination of a superconducting outer magnet with a resistive inner one) while with purely resistive magnet almost 40T can be reached. Such high fields are only available in a few specialized laboratories in the world (Tallahassee, Grenoble, Hefei and Nijmegen). As an extra benefit, these high magnetic fields with resistive magnets standard have a room temperature bore of typically 32 mm which them ideally suited for magnetoscience experiments which are mostly done near room temperature and which often involve liquids as a medium where growth takes place. Furthermore the available space allows in situ optical probing of the material studied.

In this paper I will describe the basic physics of magnetoscience and provide an overview of several experiments that we have performed in the past decades in the HFML in Nijmegen. We will cover several aspects of magnetoscience i.e. alignment of molecular matter, levitation and crystal growth under field induced microgravity and influencing chirality. Very useful reviews can be found in refs. [1] and [2]

Underlying all magnetoscience applications is the basic physics of the interaction of matter with magnetic fields. The thermodynamic free energy $U = \underline{M} \cdot \underline{B}$ where $\underline{M}$ is the magnetization is given by

$$\underline{M}(\underline{B}) = \frac{\partial E(\underline{B})}{\partial \underline{B}}$$

How the energy of matter E depends on the magnetic field $\underline{B}$ depends of course on the details of the system but to explain the basic physics we consider matter as an ensemble of hydrogenic atoms. This is of course only true for hydrogen itself but in the beginning of the periodic system (the first two rows) elements still may be considered hydrogenic. In the first row hydrogen and He behave similar albeit with different energies due to the different nuclear charge. The second row may again be described similar to hydrogen, where one considers Li with its full 1s orbits with two electrons that shield +2e nuclear charge making that the remaining electron again moves in a $1/r$ like potential with a +e charge, very much like hydrogen.

Hydrogenic states in a magnetic field are described by

$$H\Psi = \left[\frac{(\underline{p} - e\underline{A})^2}{2m} + V(\underline{r}) \right] \Psi$$

With $\underline{A}$ the vector potential containing the magnetic field and $V(r)$ the central potential. Considering the magnetic field as a perturbation on the hydrogenic states the first order energies are given by

$$E_{L,S,n}(B(z)) = E_{L,S,n} + \mu_B \langle \Psi_{L,S,n} | (\underline{L} + g \underline{S}) \cdot \underline{B} | \Psi_{L,S,n} \rangle + \frac{e^2 B^2 \langle \Psi_{L,S,n} | x^2 + y^2 | \Psi_{L,S,n} \rangle}{8m}$$

With

$$\langle \Psi_{L,S,n} | H_0 | \Psi_{L,S,n} \rangle = E_{L,S,n}$$

the unperturbed (zero field) energies, i.e. the standard Rydberg energies, L, S and n are the usual quantum number for the orbital momentum, the spin and the Rydberg states. The last two terms describe the effect of the magnetic field. The first term containing L and S describes the lifting of the orbital (L) and the spin (S) degeneracy of the ground state leading to states at lower energy for one direction of the angular momentum and higher energy for the opposite direction. This effect lowers the ground state energy for all systems with an unpaired number of electrons since these can occupy the lower lying states. This term is responsible for what is usually known as magnetism. Since the dE/dB is negative (energy is lower in magnetic fields) M is also negative and therefore the free energy U of the systems decreases with increasing field. Most magnetic phenomena commonly known like e.g. ferro magnets are caused by this contribution. The Zeeman splitting is of the order 0.1 meV/T

The second term describes diamagnetism and is caused by the deformation of the atomic orbits by the magnetic field. Diamagnetism leads to an increase in the free energy U, since dE/dB is positive, as is the induced magnetization M. The typical energies for diamagnetism is of the order of $\mu\text{eV/T}$, many orders of magnitude weaker than the Zeeman term. However it does not require an unpaired number of electrons and is relevant for all elements. Magnetoscience mostly exploits this less familiar diamagnetism.

Diamagnetism is used in magnetoscience in two ways; i) to levitate matter in magnetic fields creating pseudo microgravity and ii) to align molecular matter.

II Levitation

Since the free energy in diamagnetic material increases with increasing magnetic field, it is energetically favorable for such material to move to the low magnetic field region (low field seeking). The force pushing to lower field is $F = dU/dx$. If an object is placed from the top in a magnet with a vertical bore, gravity will pull it down to the high field region, while the diamagnetic force pushes it away from it. If gravity is canceled by the diamagnetic force the object levitates. The levitation condition is:

$$\frac{F}{\rho} = \frac{dU}{\rho dx} = - \frac{M}{\rho} \frac{dB}{dx} = - \frac{\chi}{\rho \mu_0} B \frac{dB}{dx} g$$

Where χ is the susceptibility ($\chi = \mu_0 \underline{M} / \underline{H}$), ρ density of the matter, dB/dx the magnetic field gradient and g the gravitational acceleration. For water $\chi=0.9 \cdot 10^{-5}$ and for a typical magnet dB/dx is about 1T/m and one needs 16T to meet the levitation condition which in this case is $1200 \text{ T}^2/\text{m}$. Interestingly enough the ratio χ/ρ is very similar for most organic matter, making that the levitation condition almost identical for different molecules. The origin of this similarity is directly related to the cause of diamagnetism. Going up in the periodic system from water to C, N etc. the number of electrons in orbits increases and each electron contributes more or less equal to the susceptibility. However at the same time, the atomic mass increases also and as long as the average distance between atoms in organic matter remains comparable, the increase in density of the material follows the nuclear mass and therefore the ratio density/diamagnetism remains about the same. Further down the periodic system this argument breaks down because the deeper lying electronic orbits are so strongly bound that the magnetic field cannot deform them appreciably. A second important observation is that since the levitation condition depends on the ratio χ/ρ and that the total volume of the object is irrelevant. I.e. it requires the same magnetic field to levitate a big or a small object. The only practical boundary is that a big object requires a big magnet which makes it costly. In principle one could levitate a human being with the same levitation condition as a water drop, but the huge magnet needed requiring at least a 50 cm bore would make this immensely expensive.

Magnetic levitation is already known for a long time. The earlier reports describe the levitation of a strongly diamagnetic substance like graphite that require lower magnetic fields [3]. In the eighties the advent of strong (hybrid) magnets made levitation of many more organic objects possible as reported in [4]. In the late nineties Andrey Geim (the later Nobel prize winner for his work on graphene) showed in Nijmegen that a living creature, a frog, could be levitated [5]. This, from a physics point of view, is not a very new observation but it attracted great popular attention and the frog pictures and movies were shown on major TV channels like BBC and CNN, while the webpage at the Nijmegen magnet lab attracted over a million visitors in 1998, which at that pre-youtube time was exceptional. Geim was awarded the Ig Nobel prize for the flying frog in 2000. The IgNobel is an amusing prize for “the most irrelevant but funny science”. Together with Michael Berry, Geim published a paper [6] which carefully studied the conditions for stable levitation. Stability not only requires the compensation of gravity with the upward diamagnetic force, it also requires that this occurs in a magnetic field profile in which the radial field away from the axis increases to push the levitating object away from the wall towards the center of the magnet bore. In fact because of its negative sign magnetic levitation escapes the Earnshaw theorem which states that it is impossible to stabilize in three dimensions anything with only electrostatic charges or magnetic dipoles. [6]

The flying frog and other magnetoscience experiments in Nijmegen were born out of necessity. The old Nijmegen magnet lab (the precursor of the present HFML [7]) had an old 5MW DC installation that could power a few 20T magnets and a 30T hybrid. At that time (the mid nineties) 20T superconducting magnets were commercially available and such fields did not require expensive DC power supplies with cooling plants. Renewed magnet labs like the LNCMI in Grenoble (France) and especially the newly created NHMFL in Tallahassee, which possessed 24MW+ power supplies could generate 30T purely resistive and Tallahassee was commissioning a 45T hybrid. Therefore standard low T experiments (the de Haas van Alphen effect, Shubnikov de Haas effect, Quantum Hall effect) which interested many solid state scientist could be done up to 20T in their home laboratories while experiments requiring higher fields were done in the modern high field laboratories. However 20T at

room temperature was unique and this 'magnetoscience niche' was not very much exploited. The flying frog was the first results we obtained entering this field.

Magnetic levitation is often associated with simulated microgravity. There are, as discussed later, important differences but nevertheless this similarity made us look to experiments done in space that could be done in magnetically simulated microgravity. An obvious candidate is of course crystal growth in microgravity.

Crystal growth, in particular organic crystals, often takes place in a saturated solution, where small crystallites are formed which grow as atoms or molecules are deposited on the surface. Therefore the boundary layer near the forming crystal surface (the depletion zone) is partially depleted which makes it lighter than the saturated solution further away from the surface. The lighter liquid rises up through buoyancy (the growth plume) and the depletion zone is refreshed with new saturated solution flowing towards the surface of the growing crystal. Therefore crystal growth under gravity is accompanied by liquid flow. This flow is detrimental to the crystal quality for two reasons. i) The crystal grows too fast, giving deposited matter not enough time to move along the surface to find the ideal position to bind definitely and ii) the circulation fluid motion also carries impurities to the forming surface which are built in. In space, under microgravity, the density difference does not lead to any motion and the depletion zone develops around the crystal slowing down growth and preventing the inclusion of impurities.

The apparent weightless conditions in space microgravity is caused by the fact that all matter, irrespective of its mass, is free falling at the same velocity. Therefore the crystal growth plume disappears. Magnetic levitation is different from true microgravity because it is caused by a perfect balance of forces, i.e. gravity is compensated by diamagnetic expulsion of the magnetic field. In order to suppress the growth plume in crystal growth it is therefore necessary to balance the downward forces and the upward forces in the depleted, index 1 (near the surface) and the dense, index 2, phase simultaneously [8]. I.e,

$$B(z)B'(z) = \frac{\Delta\rho}{\Delta\chi}\mu_0 g \quad \text{With} \quad \Delta\rho = \rho_2 - \rho_1 \quad \Delta\chi = \chi_2 - \chi_1$$

This condition is very different from the simple levitation condition and leads to very different field values compared to what is needed for simple levitation.

We studied with in situ Schlieren and contrast microscopy the growth of nickel sulfate hexahydrate from solution [9]. This material was chosen because the differences $\Delta\rho$ and $\Delta\chi$ between the solid grown crystal and the saturated liquid leads to a condition for the plume suppression of $39\text{T}^2/\text{m}$ allowing a study at relatively low fields. As pointed out earlier, this number is much lower than the $1200\text{T}^2/\text{m}$ needed for levitation. A careful study and analysis [10,11] of the growth in magnetic field simulated microgravity shows that the effective gravity, which is zero at the plume suppression field B_s , scales with $(B-B_s)^4$ which makes that the field must be chosen quite precisely. The interest in making perfect single crystals under microgravity lies above all in the growth single crystals of proteins that are needed for structure determination and that is of great interest to the pharmaceutical industry. We therefore showed that magnetic field simulated microgravity can also be used for proteins and we demonstrated this with egg white lysozyme [12] which is found to need

4600T²/ m to suppress the growth plume. This condition that can only be met in very high magnetic fields.

III Magnetic alignment

An isotropic object (molecule, nanocrystal,..) with a susceptibility per molecule χ in a magnetic field acquires an extra energy U

$$U = - \begin{pmatrix} \chi_{\parallel} & & \\ & \chi_{\perp} & \\ & & \chi_{\perp} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_x & B_y & B_z \end{pmatrix} = -[\chi_{\parallel} B_x^2 + \chi_{\perp} (B_y^2 + B_z^2)]$$

Where χ is negative for a diamagnet. If $\chi_{\parallel} \gg \chi_{\perp}$ it is energetically favourable for the molecule to align perpendicular to the magnetic field. Therefore molecules with an anisotropic susceptibility will align in a magnetic field along the axis with the smallest susceptibility. For instance a benzene molecule which consists of 6 C atoms in a hexagon, will preferably align with its plane parallel to the magnetic field because in that case the induced diamagnetic moment is much smaller than in the perpendicular direction. However, for a single molecule this effect is very weak because diamagnetism is very weak. For instance the benzene molecule has an anisotropy $\Delta\chi = -60 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{mol}$ giving rise to an energy difference between the two orientations of the molecule in a magnetic field of $\Delta U = \Delta\chi B^2/\mu_0$ which corresponds to 10^{-5} kT at 300K and at 20T. I.e. the energy gain by aligning even at these high fields is negligible for a single molecule. However, a cluster of, for instance, 10^5 benzene molecules or larger will align. Such a cluster corresponds to a microcrystallite of about 3nm. I.e. only larger (but still nm sized objects) ordered aggregates of molecular material with a significant anisotropy will align in attainable magnetic fields. The degree of alignment is determined by the Boltzmann factor $e^{-N\Delta U/kT}$, where ΔU the field induced energy gain per molecule and N the number of molecules per cluster.

To measure the degree of alignment of the aggregates in solution we can either measure the change of the real part of the dielectric constant (field induced birefringence) or the change in the imaginary part (absorption, or field induced dichroism). The latter contribution is only measurable in the vicinity of an optical absorption band. In the following we will review a few examples of the use of magnetic field induces alignment either as a useful characterization technique or as a way to produce ordered materials.

Molecules in a solid under the right conditions (temperature or concentration) can form clusters. These clusters are made from a particular way of stacking of the constituent materials. For instance in the form of rods (all molecules stacked on top of each other) with the molecules having a specific orientation with respect to the rod axis. Also more complicated stacking like the herringbone structure where adjacent stacks of molecules have alternate angles (as with a herringbone). The optical anisotropy is determined by the polarization of the light with respect to the angle of the molecule. In a magnetic field the orientation of the molecules with the magnetic field determines the alignment and if the clusters are large enough and the field high enough, studying the optical activity (dichroism or birefringence) with different light polarizations provides information of the internal

structure of the clusters. This technique was exploited to study dye aggregates [13] made from different dye molecules or supramolecular aggregates [14, 15].

Maybe even more interesting is the creation of ordered materials. A saturated solution under conditions where aggregation does not yet take place (above a transition temperature for instance) is placed in a high magnetic field. The aggregation process is initiated, for instance by lowering the temperature or by adding a chemical agent stimulating cluster formation, and clusters start to form. When they have grown in size sufficiently they can align in the magnetic field and as they grow even more they will merge together forming an ordered crystalline state. We used this technique to create ordered polymer liquid crystals[16] or gels [17,18], study domain dynamics in CB8 liquid crystals [19] and create ordered conducting polymers from coronene molecules [20]. In the latter case we have shown that in the ordered phase the mobility in the conducting polymers is about two orders of magnitude higher than in the disordered phase.

We also used magnetic alignment to study deformation of nm sized molecular structures. A special rod like molecule (6T, sexithiophene) with a hydrophobic central part and hydrophilic tails on both ends, aggregates in a watery liquid in the form of hollow spheres. In the aggregation the molecules initially form sheets with all the hydrophobic parts sticking together to avoid contact with water and eventually these sheets fold into spheres, minimizing the energy by making that all the hydrophobic parts are now not in contact with water. In these spheres all molecules are oriented pointing towards the center of the sphere. In a magnetic field the molecular rods of the individual molecules want to align along the magnetic field. The rods on the top of the bottom of the sphere already have this orientation but the ones on the equator are in very unfavourable orientation. The only way to decrease their energy is by deforming the sphere into an oblate ellipsoid [21]. This way the magnetic energy is put in competition with the elastic energy in the 100nm sphere and by measuring the deformation optically this elastic energy can be determined [22]. Subsequently we exploited this technique even further with larger supramolecular vesicles. The vesicles are hollow molecular structures made from stacked lyzosome molecules [23] They are much larger than the hollow 6T structures discussed previously and at a certain size these spheres, which are very flexible and stretchable, collapse into a flat double walled pancake which in turn can fold into an incomplete sphere, i.e. with an opening resulting from the folding of the double wall. These spherical objects with an opening are called stomocytes and we have shown that with a magnetic field field on or off, one can open and close the hole. The stomacyte can capture a small marker molecule that is in the liquid when it is opened with the magnetic field on and trapped with the field off. Reapplying the field later or in another environment one can liberate the molecule trapped inside. With suitable marker molecules we have shown that this technique works thus demonstrating a possible wayof magnetic field controlled drug delivery. [23]

IV Controlling chirality

Many molecular structures have chiral properties. The word chiral comes from the greek word $\chi\epsilon\iota\rho\omicron\sigma$ for hand and describes a symmetry property where two objects are each other's mirror image but where it is impossible to transform one in the other by rotations and translations only. Objects showing this symmetry property are called chiral. A pair of hands is a clear example of two chiral objects with left and right symmetry. Many molecules or molecular structures have this symmetry and it is very difficult to find a way in which only one species with the same handedness is

made because thermodynamically (energy and entropy) both enantiomers are completely equivalent. However the handedness of a molecule is not only of pure academic interest since the different enantiomers can have very different physiological effects. For instance as a left handed molecule aspartan is a sweetener while the right handed version is bitter, left handed citric acid tastes like lemon and the right handed version is poisonous, and a very dramatic example is the drug thalidomide (softenon) which in the left version is a sedative while the right version causes foetal anomalies. It is therefore important to steer or control handedness of molecules. Molecules in life like DNA, the carrier of genetic properties, also have one well defined chirality and as yet there are no explanations why this particular chiral direction has evolved.

Chirality is easily associated with magnetic fields since the Lorentz force on charged particles in a magnetic field leads to a circular motion and consequently optical properties in magnetic field depend on the circular polarization (left or right circular) of the light. Nevertheless a magnetic field alone is not chiral since the left and right circulating carriers can be transformed into each other by a $\pi/2$ rotation and/or time reversal. The combination of magnetic fields with other vectors like a rotation axis or gravity may be chiral.

We investigated field induced chirality in an experiment where phthalocyanine molecules stack on to of each other. These molecules can be approximated as square platelets with identical end groups on three corners and a different group on the fourth. When they stack together this asymmetry makes that they stack in either left or right rotating piles. Under normal conditions the aggregates formed will be half left and half right chirality. The degree of chirality can be measured by circular dichroism (CD) which is zero when the system is not chiral because both enantiomers are present in equal amounts. When one enantiomer is more abundant CD shows a signal.

In the experiment we mounted seven identical cylindrical containers attached on top of each other to a rotating rod inside the magnet. When the field increases the container in the center feels a high field but normal gravity since there is no magnetic field gradient in the center. Containers higher on the axis feel a reduced gravity because the field gradient pushes the liquid against gravity, while container below the field center feel an enhanced gravity since the field gradient is oriented in the other direction. We rotated the container with the liquid for fifteen minutes in the magnetic field after introducing a clustering agents which triggers the formation of stacks from the individual molecules. After these fifteen minutes the containers are left (under controlled temperature and light conditions) alone for three day after which the circular dichroism was measured. The experiment was repeated with several different rotation frequencies, magnetic field direction and value and all experiments showed that there is a unique combination of the direction of effective gravity and the rotation that always (100%) produces one sign of circular dichroism. Without a field, but with rotation alone no chirality was observed. This experiment shows for the first time that we can use magnetic fields to steer chirality of the selfassembly by external forces, This experiment may help to understand the formation of chiral systems and possibly may help to provide insight into the origin of the chirality of life.

V Conclusions and acknowledgement

Diamagnetism and magnetic forces on 'non magnetic, organic' matter at high continuous magnetic fields can be used to levitate organic matter, simulate microgravity, create ordered structures with favourable optical and electrical properties, study the internal structure of molecular clusters and

steer chirality of self assembled objects. Since diamagnetism in organic matter is relatively weak the effect on individual molecules is negligible but for nm sized clusters it may exceed the thermal energy. Therefore studies are often done near a phase transition where cluster or liquid crystalline states are formed. This paper has demonstrated that despite this smallness magneto science can be used to address a several interesting physical problems and demonstrates the potential useful applications.

This review summarizes the work done at the Nijmegen High Field Magnet Laboratory in the past twenty years together with Peter Christianen. I am very grateful for this pleasant, long standing and successful collaboration. The work reported here was done by the following PhD student Marius Boamfa (2003), Giorgia Tordini (2016), Igor Shklyarevskiy (2005), Maurits Heijna (2008), Paul Poodt (2008), Jeroen Gielen (2010), Peter van Rhee (2015) and Roger Rikken (2016) who all completed their theses at the Radboud University Nijmegen in the year indicated. I want thank the Japanese Magneto Science Society of Japan for awarding me a life time achievement prize for this work.

References

- 1) G. Maret and K. Dransfeld: Topics in Applied Physics, Vol. **57**, 143-204, ed. F. Herlach, Springer Berlin, (1985)
- 2) R.S.M. Rikken, R.J.M. Nolte, J. C. Maan, J.C.M. van Hest, D.A. Wilson and P. C. M. Christianen.: Soft Matter **10**, 1295. (2014),
- 3) W. Braunbeck, Z. Phys. **112**, 735, (1939)
- 4) E. Beaunon, R. Tournier, Nature **349**, **470**, (1991)
- 5) A. Geim, Physics Today **51**, 9, 36 (1998)
- 6) M. V. Berry, A. K. Geim, Eur. J. Phys. **18**, 307 (1997)
- 7) J.A.A.J. Perenboom; S.A.J. Wiegers, P.C.M. Christianen, U. Zeitler; J.C. Maan, J. of Low Temp. Phys. **133**, 181-201, (2003)
- 8) N. Ramachandran and F.W. Lesley, Journal of Crystal Growth, **274**, 297, (2005)
- 9) P.W.G. Poodt, M.C.R. Heijna, P.C.M. Christianen, W.J.P. Enckebort, W.J. de Grip, K. Tsukaoto, J.C. Maan and E. Vlieg, App. Phys. Lett **87**, 214105, (2005), and Crystal Growth and Design **6**, 2276, (2006)
- 10) P.W.G. Poodt, P.C.M. Christianen, W.J.P. van Enckevort, J.C. Maan and E. Vlieg, Crystal Growth and Design , **7**, 2194, (2008)
- 11) P.W.G. Poodt, P.C.M. Christianen, W.J.P. van Enckevort, J.C. Maan and E. Vlieg, Crystal Growth and Design , **7**, 2200 (2008)
- 12) M.C.R. Heijna, P.W.G. Poodt, J.L.A. Hendrix, K. Tsukamoto, P.C.M. Christianen. W.J.P. van Enckevort, W.J. de Grip and E. Vlieg, Appl. Phys. Lett. **90**, 264105, (2007)
- 13) I.O Shklyarevski, E. Aret, H.L.M. Meekes, G. Deroover, P. Callant, E. Vlieg, P.C.M. Christianen, J.C. Maan, J. Phys. Chem **B108**, 16386 (2004)
- 14) J.C. Gielen, I.O. Shklyarevskiy, A.P.H.J. Schenning, P.C.M. Christianen, J.C. Maan, Science and Technology of Advanced Materials **10**, 0124601 (2009)
- 15) M.I. Boamfa, P.C.M. Christianen, H. Engelkamp, R.J.M. Nolte, J.C. Maan, Advance Functional Materials **14**, 261 (2004)
- 16) M.I. Boamfa, K. Viertler, A. Wewerda, F. Stelzer, P.C.M. Christianen, J.C. Maan, Phys. Rev. Lett. **90**, 2, (2003) and Phys. Rev. **E67**, 050701 (2003)
- 17) D.W.P.M. Lowik, I.O. Shklyareckiy, I. Ruizendaal, P.C.M. Christianen, J.C. Maan, J.W. van Hest, Advanced Materials **19**, 1191, (2007)
- 18) I.O. Shklyarevskiy, P. Jonkheijm, P.C.M. Christianen, A.P.H.J. Schenning, A. Del Guerzo, E.W. Meijer, J.C. Maan, Langmuir **21**, 1208, (2005)
- 19) G. Tordini, P.C.M. Christianen, J.C. Maan, Molecular Crystals and Liquid Crystals **435**, 915 (2005)
- 20) I.O. Shklyarevskiy, P. Jonkheijm, N. Stutzmann, D. Wasserberg, H.J. Wondergem, P.C.M. Christianen, A.P.H.J. Schenning, D.M. de Leeuw, Z. Tomovis, J.S. Wu, K. Mullen, J.C. Maan, J. Am. Chem. Soc. **127**, 16233 (2005)
- 21) I.O. Shklyarevskiy, P. Jonkheym, P.C.M. Christianen, A.P.H.J. Schenning, E.W. Meijer, O. Henze, A.F.M. Kilbinger, W.J. Feast, A. Del Guerzo, J.P. Desvergne, J.C. Maan, Am. Chem. Soc. **127**, 1112 (2005)
- 22) O.V. Manyuhina, I.O. Shklyarevskiy, P. Jonkheym, P.C.M. Christianen, A. Fasolino, M. Katsnelson, A.P.H.J. Schenning, E.W. Meijer, O. Henze, A.F.M. Kilbinger, W.J. Feast, A. Del Guerzo, J.P. Desvergne, J.C. Maan, Phys. Rev. Lett. **98**, 146101 (2007)

- 23) P.G.van Rhee, R. S. M. Rikken, L.K.E.A. Abdelmohsen, J. C. Maan, R.J.M.Nolte, J.C.M. van Hest, P.C.M. Christianen, D.A. Wilson, *Nature Commun* **5**, 5010, (2014)
- 24) N. Micali, H, Engelkamp, P.G. van Rhee, P.C.M. Christianen, L.M. Scolaro, L. Monsu, J.C. Maan, J. C., *Nature Chemistry* **4**, 201 (2012)

研究奨励賞を受賞して—磁気科学と私のこれから—

信州大学 大学院総合工学系研究科 大塚隼人

信州大学 尾関・浜崎研究室博士課程 1 年の大塚隼人と申します。この度、研究奨励賞受賞に際しまして記事執筆の機会を三井先生より頂きました。まず初めにこのような荣誉ある賞を受賞でき光栄に思います。若手の研究者を評価する研究奨励賞の受賞は今後研究を続けていく上での大きな励みとなりました。ご指導して下さった尾関先生をはじめ、助言頂きました浜崎先生、審査委員会の皆様にこの場をお借りして厚く御礼申し上げます。

せっかくの機会ですので私のこれまでの研究生活と思いを少し綴ります。私は理学部化学学科の物理化学分野に所属しており、学部 4 年生のとき尾関・浜崎研究室に配属され、磁場を使った研究を始めました。実は大学入学当初より将来は有機化学の道に進もうと思っていたのですが、学部生時代のドイツ留学を経て熟考の末に物理化学を専攻すると決めました。尾関先生の磁気処理水の研究に興味を持ち、水の研究がしたいと思っていた私に初めに与えられた研究テーマは水の凍結電位でした。しかし水の凍結電位の研究は当研究室で過去に数名やっていたこともあり、何か新しいことをやろうということになりました。尾関研究室ではコロイド・界面化学分野の研究していますが、その一例として新たにイオン液体を扱うことになり、テーマ決定から 3 か月後、イオン液体の凍結電位が私のテーマになりました。「イオン液体とは何ぞ」というところから始まった私の研究でしたが、尾関先生のご指導と磁場の助けを受けながら、現在では磁場がイオン液体の液体-液体の相変化を引き起こすのではないかとということまで来ました。早いもので 4 年。研究は辛いとき、楽しいときいろいろありましたが、今では磁場という不思議な力に魅了されています。

磁気科学会の皆様との出会いは、配属されてすぐに沖縄で開催された MAP6 でした。初めての学会参加というのもあったのですが、ホテルの 13 階の部屋の窓にワカメが飛来するほどの過去最大級の台風直撃で最も印象に残っている学会です。磁気科学の学会では磁場という一つの外場を共通点として、生物・物理・化学など様々な分野の研究者が一同に介して議論しあうため、自分の専門外の話もたくさん聴けます。学部生時代は講演を聴いてもわからないことだらけでしたが、現在ではいろいろな分野での研究の動向を知り、新たなアイデアを得る貴重な機会になっています。また他分野の研究をされている先生方からの質問やコメントは自分の研究を進めていくうえで、様々な観点から自分の研究を見直すきっかけを与えてくれます。そのため磁気科学会は毎年非常に楽しみにしています。

私は博士課程修了後は大学で研究を続けていくつもりです。理学部所属ということもあり、純粹に面白いと思う事象を探究したいというのが本音ですが、研究者として生き残っていくためには成果を論文にしなければなりません。現在は一報目の論文を執筆中で、磁気科学を世界に広げていくためにもインパクトのある論文を書けたらと思います。これから論文を出すのはもちろんですが、科学的に面白い事象を常に追い求めながらがっちりとした研究をして、磁場と化学が織りなす現象の魅力を世界に伝えていきたいです。

学生ポスター賞を受賞して

京都大学 木村陽介

ポスター賞をいただき誠にありがとうございます。ご指導いただいた木村恒久教授をはじめ、研究室の皆さまに感謝申し上げます。今回の学会では多くの方が絶えず話を聞きに来てくださり非常に充実した時間が過ごせたことを覚えています。

さっそく、今回受賞した研究内容について述べます。内容は回転磁場下でランジュバンの反磁性に加えてファラデーの反磁性という新たな反磁性が発生することを発見したというものです。次に「ファラデーの反磁性とはどのようなものか」について詳しく述べていきます。自由電子に振動磁場を印加した場合、ファラデーの電磁誘導の法則に従い、渦電流が生じます。

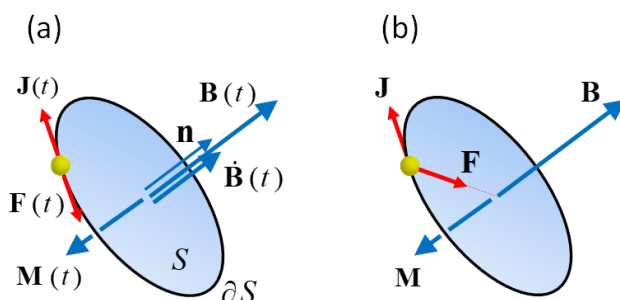


Fig. 1 (a) ; ファラデーの反磁性および (b) ; ランジュバンの反磁性のモデル

これと同様に、束縛電子に振動磁場 $\mathbf{B}(t)$ を印加すると、自由電子の場合と同様に渦電流 $\mathbf{J}(t)$ (ただし、電子軌道に沿って) が生じると考えられます。すると、磁気モーメント $\mathbf{M}(t)$ が発生し、これが印加している振動磁場と相互作用し磁気エネルギーが生まれます。この磁気エネルギーは電子軌道の等価電気回路を直列 RL 回路と仮定すると反磁性を強めるものになります。この反磁性を我々はファラデーの電磁誘導の法則にちなみファラデーの反磁性と名付けました。しかし、我々の知る限り、束縛電子に振動磁場をかけた際の磁性変化に関する研究はほとんど報告されていません。そこで、我々は束縛電子に回転磁場を印加したときの磁性変化に関する研究を進め、その結果、L-alanine, calcite, urea, D-mannitol の反磁性が回転磁場下でランジュバンの反磁性と同程度増強されることを見つけました。この結果は、ボーアの電子軌道を用いたモデルから見積もった値とよく一致しています。こちらが今回、発表させて頂いた研究です。加えて、磁気科学会での発表後、複数の物質で新たにファラデーの反磁性の確認に成功しています。

次に、僥越ながら受賞を狙う後輩の参考になればと思い、今回の発表で気を付けた点、工夫した点について述べます。まず、プレゼンをするというより対話を意識しました。とにかく、少し砕けてもいいのでお互い納得するまで議論することを心掛けました。また、発表練習をしてみて、説明しにくいと感じた部分の補足の図を印刷して持っていました。あとは受賞経験のある先輩にアドバイスを求めたり、ネットにコツがいっぱい書いてあるので実践しました。

最後に、今回の受賞は学生時代に多少なりとも科学的な考え方を身につけることができた証だと考えています。現在、私は修士課程を修了し金融業界で働いていますが、この経験を活かし、日本をはじめ世界経済の発展に寄与できれば幸いです。

これまでの研究生活を振り返って

日本大学大学院生産工学研究科 片山 大輔

この度、日本磁気科学会の学生ポスター賞という荣誉ある賞をいただきまして、審査委員ならびに実行委員の皆様、共同研究者の皆様に心よりお礼申し上げます。今回受賞するにあたり記事の執筆を任され、大学生活を振り返る良い機会を与えていただきましたので、記させていただきますと思います。

私は祖母が患っていたこともあり、磁場を応用してアルツハイマー型認知症の治療を目指す研究に興味を引かれ、それまで全く関心のなかった磁場の分野に足を踏み入れました。

私が所属する機械工学科では電磁気学などの磁場に関する講義は皆無で、3年生になりゼミを受けるまで全く未知の領域でした。高校生の電磁気学の基礎もあやふやだった自分にはとても新鮮で、先輩方から研究の内容や磁気科学の基礎について教えてもらっているときは楽しかった記憶があります。4年生になり、私は磁気刺激についての研究を始めました。研究を進めていくうえで私は磁場解析ソフトでシミュレーションを行うことになり、目で見ることができない世界を可視化することが出来るシミュレーションに興味を持つようになりました。

大学院進学後は、本格的にシミュレーションを学びたいと思い研究のテーマを大きく変更しました。磁気科学同様、機械工学科では数値解析やプログラミングの講義が皆無でしたので、以前に安藤先生が作成したプログラムを解説するのにかなりの時間がかかり、夏の終わりまではほとんど何の成果もあげることが出来ませんでした。ようやくプログラムに慣れ、少しずつ新しいシミュレーションができるようになったころ、第11回日本磁気科学会年会(NIMS)があり、これが私の学会のデビューとなりました。

M2になり、大学院進学後からの目標であった、東京大学で開発しているコロイドを対象にしたシミュレーターのSNAPに磁場効果を組み込むことになりました。SNAPはそれまで私が扱ってきたプログラムよりもはるかに複雑で、プログラムが完成したのは9月の半ば頃でした。当時なかなかプログラムが完成せず、焦っていた私ですが、プログラムが完成した時の喜びと感動は一生忘れないと思います。プログラムの完成後一息つく間もなくシミュレーションを実施し、第12回日本磁気科学会年会(京都大学)の概要を作成したこの期間はとても忙しく、泣き言ばかり言っていたように思います。概要提出後に何度も共著者の先生方と議論を重ね、内容を精査した結果、自分の納得のいく発表を行うことが出来ました。

今になって学部生の頃の自分を思い返してみると、大学院の2年間は自分を大きく成長させてくれたと思います。磁気科学やシミュレーションの知識はもちろんのこと、研究を通して物事の考え方やプレゼンの方法、後輩への指導の仕方など、多くのことを学ぶことができ、こうして学会で賞を受賞できるまでに成長することができました。最後になりますが、研究の指導はもちろんのこと、外部の先生方との議論の機会を多く与えてくださった安藤先生に深く感謝を申し上げ、結びとさせていただきますと思います。

2017 年会計報告

物材機構 廣田 憲之

2017 年の収入および支出は、以下の通りであることをご報告いたします。

日本磁気科学会 2017年 会計報告書

収入の部				
予算額				¥4,526,839
会費				
正会員	¥5,000	95		¥475,000
学生会員	¥0	104		¥0
賛助会員	¥50,000	4		¥200,000
前年度繰越				¥3,851,839
2017年収入				
				¥675,000
支出の部				
予算額				¥4,526,839
年会補助金				¥400,000
研究会補助金				
				¥200,000
第20回研究会				¥100,000
第21回研究会				¥100,000
WEBサーバー				¥12,000
褒章費用				¥200,000
事務局経費				¥120,000
予備費				¥100,000
繰越金				¥3,494,839
2017年支出				
				¥1,032,000

決算額				
				¥4,463,595
会費				
正会員	¥5,000	34		¥170,000
学生会員	¥0	34		¥0
賛助会員	¥50,000	6		¥300,000
会費(滞納分) 正会員	¥5,000	6		¥30,000
年会剰余金				¥111,732
雑費				¥24
前年度繰越				¥3,851,839
2017年収入				
				¥611,756
決算額				
				¥4,463,595
年会補助金				¥0
印刷費				¥149,040
研究会補助金				¥133,780
第20回研究会				¥43,960
第21回研究会				¥89,820
WEBサーバー				¥45,792
褒章費用				¥195,036
盾・賞状				¥45,036
旅費補助				¥150,000
事務局経費				¥120,000
雑費				¥1,728
繰越金				¥3,818,219
2017年支出				
				¥645,376

上記の通り会計報告をいたします。

財務 廣田 憲之 (廣田)

適正に執行されていることを確認いたしました。

監事 尾関 昇美男 (尾関)

監事 柳下 知行 (柳下)

2018 年 事業計画

事務局長 安田秀幸

本会会則第 13 条に基づき、2017 年理事会および 2017 年総会において、2018 年 1 月から 12 月までに以下の事業を行うことが議決により承認された。

1. 第 13 回年会

北海道東北支部の主催により東北大学で開催する。

2018 年 11 月 12 から 14 日 東北大学金属材料研究所講堂

2. 第 22 回研究会

物理化学分科会的主催により開催する。

2018 年 9 月 1 日 13:00～17:00 京都大学 国際科学イノベーション棟

3. 第 23 回研究会

磁場発生分科会的主催により開催する。

2018 年 11 月 14 日 13:30～16:30 東北大学金属材料研究所講堂

4. 会誌発行

第 12 巻を発行する。

5. 総会

会則第 20 条により総会を開催し、第 22 条に従って事業報告および会計報告等を行う。本年は年会の会期中に行う。

6. 学会表彰

第 8 回優秀学術賞および第 8 回功労賞に関して、規定および内規に従い選考を行い、年会において授賞式を行う。

7. 共催、協賛、後援等

日本磁気学会主催の研究会（年 6 回）、応用物理学会磁気科学研究会等の国内外の関連する団体とタイアップして学会および研究分野の発展をはかる。

以上

第1章 総則・目的・事業

第1条 この団体は日本磁気科学会（以下本会）という。

2 本会の英文呼称は **The Magneto-Science Society of Japan** とする。

第2条 本会は磁気科学を研究している、あるいは興味を持つ国内外の個人および諸団体の相互の連絡を促進し、国内外の磁気科学の発展とその成果の普及に務め、学術・教育・産業・環境・資源・医療・福祉などの各分野に寄与することを目的とする。

第3条 本会は、前条の目的を達成するために、次の事業を行う。

- (1) 磁気科学に関する研究集会を開催する。
- (2) 磁気科学に関する図書を発行する。
- (3) 磁気科学の研究を促進するための必要な事業を行う。
- (4) 磁気科学の成果を普及するための必要な事業を行う。

第4条 この会則の実行に必要な規則の制定・改廃は理事会が行う。

第5条 本会のすべての会議は議事録を作成し、事務局が保管する。

第2章 会員

種類

第6条 会員は、国籍または本拠の存在する国は問わず、次の4種類とする。

- (1) 正会員
- (2) 学生会員
- (3) 賛助会員
- (4) 提携会員

2 正会員は本会の事業に参加する研究者・技術者・教育者およびその他の個人とする。

3 学生会員は本会の事業に参加する大学および大学院に在学中の者とする。

4 賛助会員は本会の事業に協力する営利団体とする。

5 提携会員は本会の事業に協力する非営利団体とする。

入会

第7条 本会に入会しようとするものは、別に定める規則によって事務局に申し込み、理事会の承認を得なければならない。

2 会員は別に定める規則により入会金・会費を納めるものとする。納入した入会金・会費は払い戻さない。

権利

第8条 会員は次に掲げる権利を有する。

- (1) 本会の催す研究集会での発表およびその他の行事への参加
- (2) 本会に対する希望を申し出てその審議を求めること
- (3) 本会の発行する図書への寄稿

退会・除籍・除名

第9条 会員は別に定める規則により会長に届け出て退会することができる。

2 会員は死亡し、または失踪宣言を受け、または賛助会員または提携会員である団体が解散したときはその資格を喪失し、除籍となる。

3 会員が次の事項に該当するときは、会長が除名することができる。

- (1) 正当な理由なく会費等を1ヵ年以上滞納したとき
- (2) 本会の名誉を傷つけ、理事会の承認後、総会において除名の決議が行われたとき

第3章 組織

役員

第10条 本会に次の役員を置く。

- (1) 理事（会長）1名
- (2) 理事（副会長）3名以内（うち事務局長1名）
- (3) 理事（上記(1),(2)以外）理事全員で25名以内
- (4) 監事2名以内
- (5) 顧問 若干名

2 役員は無給とする。

3 理事および監事は総会において正会員中から選任する。

理事・監事の選任の方法は別に定める規則による。

理事会

第11条 理事会は理事および監事により構成される。

2 理事は互選により会長を選出する。

3 理事・監事の任期は1月1日から翌年の12月31日までの2年間とする。

4 理事・監事は再任ができる。ただし、連続して就任できる期間は3期6年までとする。

5 監事は理事を兼ねることができない。

第12条 会長は本会を代表し、会務を総理する。

2 会長は総会および理事会を招集してその議長となる。

3 会長は副会長を指名する。

4 副会長は会長を補佐し、会長の指示により、または会長に事故あるときは、その職務を代行する。

5 事務局長は、会長の指示により、本会の事務及び事務局委員会を掌理する。

6 その他の理事は、会長の指示により会務を担当する。

7 監事は本会の会計と業務を監査する。

第13条 理事会は、この会則に定める総会の権限であるもの以外の次の事項を議決し執行する。

- (1) 事業計画および収支予算
- (2) 事業報告および収支決算
- (3) 会員の入退会
- (4) 諸規則の制定および改廃
- (5) その他重要な事項

第14条 理事・監事が次の事項に該当するときは、総会の議決に基づいて解任・交代することができる。

- (1) 一身上の都合により役員の任を続けられないとき
 - (2) 心身の障害のために職務の執行に耐えないとき
 - (3) 職務上の義務違反または役員たるにふさわしくない行為があるとき
- 2 任期の途中で新しく選任された役員の任期は前任者の残余の期間とする。

顧問

第15条 顧問は、会長が有識者の中からこれを委嘱する。

- 2 顧問の任期は、委嘱した会長の任期と同じとする。
- 3 顧問は再任ができる。
- 4 顧問は他の役員を兼ねることができない。

第16条 顧問は、会長の求めに応じて意見を述べることができる。

- 2 顧問は随時、会長に対して意見具申ができる。

事務局

第17条 本会は会長の下に事務局を置く。

- 2 事務局は事務局長(理事・副会長)が管理する。
- 3 事務局の運営は別に定める規則による。

支部

第18条 本会は理事会の下に支部を置き、各地域において本会の事業を促進する。

- 2 会長が理事のうちから支部長を指名する。
- 3 支部の設置・運営は別に定める規則による。
- 4 必要に応じて国外に支部をおくことができる。

分科会

第19条 本会は理事会の下に分科会を置き、各分科における研究を促進する。

- 2 会長が理事のうちから分科会長を指名する。
- 3 分科会の設置・運営は別に定める規則による。
- 4 必要に応じて時限的な分科会を設置することができる。

第4章 総会

第20条 総会は正会員によって構成される。

- 2 通常総会は毎年1回、会長が招集する.
- 3 臨時総会は次の場合に会長が招集する.
- (1) 会長がこれを必要と認めたとき
- (2) 正会員の5分の1以上からあらかじめ議事を示して請求されたとき

第21条 会長が総会の議長となる.

- 2 会長の指名により、会長以外の者が総会の議長となることができる.
- 3 総会は正会員の2分の1以上が出席しなければ議事を開き議決することはできない.
- 4 正会員は書面あるいは書面に替わるものをもって会議に出席することができる.
- 5 総会の議事は出席者の過半数をもって決し、可否同数のときは議長の決するところによる.
- 6 総会は郵便・電子メール等による通信媒体を利用して開催することができる.

第22条 総会は、理事会から提出される次の事項を議決する。

- (1) 理事・監事の選任
 - (2) 事業報告および収支決算
 - (3) 事業計画および収支予算
 - (4) その他理事会において必要と認めた事項
- 2 総会は、正会員の5分の1以上からあらかじめ請求された議事を審議する。

第5章 資産および会計

第23条 本会の会計年度は毎年1月1日にはじまり12月31日に終わる。

第24条 本会の資産は次のとおりである。

- (1) 入会金および会費
- (2) 事業に伴う収入
- (3) 資産から生じる果実
- (4) 寄付金品
- (5) その他の収入

第25条 本会の資産は理事会の議決を経て会長の指示の下で事務局長が管理する。

第26条 本会の事業計画および収支予算は、毎会計年度の開始前に、会長の指示の下に事務局長が起案し、理事会の議決を経て、総会にて承認を受けなければならない。

2 本会の収支決算は、毎会計年度の終了後に、会長の指示の下に事務局長が作成し、理事会の議決を経て、総会にて承認を受けなければならない。

第6章 著作権

第27条 本会の発行する出版物ならびに Web サイト等に記載された各種記事の著作権は本会に属するものとする。また、転載の希望がある場合は所定の様式の転載許可申請書を提出すること、ならびに

完全引用の場合は内容に関して一切の改変を認めないこと、部分引用の場合は完全な引用情報を付すことを条件に転載を認める。ただし、これらの各種記事の著者が自己引用する場合はこの限りではない。

第 7 章 会則の改廃および解散

第 2 8 条 本会則を改廃するには理事会の提案により、総会で過半数の同意がなければならない。

第 2 9 条 本会を解散するには理事会の提案により、総会で 4 分の 3 以上の同意がなければならない。

補則

- 1 本会は 2006 年 4 月 1 日に発足する。
- 2 発足時から 2006 年度通常総会が開催されるまでの間は旧新磁気科学研究会の会則および人事を援用する。
- 3 本会則に関わらず、2007 年度の会費を事前に徴収するものとする。

以上

日本磁気科学会 理事会運営規則

2007/06/06理事会決定

総則

第1条 本規則は、日本磁気科学会会則に従い、日本磁気科学会理事会(以下、理事会という)の運営に関して制定するものである。

第2条 理事会に関わる事務は事務局が処理する。

会議の開催

第3条 理事会は会長が招集し、その議長となる。

2 会長の指名により、会長以外の者が理事会の議長となることができる。

3 議長は、原則として、年1回以上、理事会を開催しなければならない。

4 議長は、理事および監事の2分の1以上により請求されたときには理事会を開催しなければならない。

5 理事会の議決は、理事および監事の2分の1以上の出席があった場合のみ有効とする。

6 理事および監事は、議長ないし理事または監事の1に委任状を託して議決を委任することができる。

7 理事会は郵便・電子メール等による通信媒体を利用して開催することができる。

8 議長は、必要あるときは理事と監事以外の者を理事会に参加をさせ、意見を聴取することができる。

会議の議決

第4条 理事会の議事は出席者の過半数をもって決し、可否同数のときは議長の決するところによる。

2 第3条8項により参加した者は議決権を有しない。

理事の職務担当

第5条 理事の職務担当は次のとおりとする。

(1) 会長

(2) 副会長(①事務局長、②分科会総括、③会長が指示する職務)

(3) 支部長(①北海道・東北支部、②関東支部、③中部支部、④近畿支部、⑤中国・四国・九州支部)

(4) 分科会会長(①物理化学分科会、②高分子・材料プロセス分科会、③無機・金属分科会、④有機・バイオ分科会、⑤分離・分析分科会、⑥磁場発生分科会)

(5) 特定事項担当(①産学官連携、②国際会議)

(6) 事務局委員会(①事務局長((2)の①に同じ)、②財務委員長、③広報委員長、④企画委員長)

(7) その他、会長が指示する職務

2 理事は複数の職務を担当することができる。

支部

第6条 支部の事業は支部長が統括する。

2 支部長の下に支部組織を設け、その形態および運営は支部において決定する。

3 支部に関わる事務は支部組織が処理する。

4 支部における事業は次の事項とする。

- (1) 支部地域における磁気科学の振興
- (2) 支部地域における本会会員の増員
- (3) 本会年次大会の実行

第7条 支部の事業計画および予算収支は、毎会計年度の開始前に支部が起案し、理事会の承認を得なければならない。

- 2 前項に関りなく、緊急に必要とされる事業は、会長の承認の下に行うことができる。
- 3 支部の事業実績および収支決算は、毎会計年度の終了後に支部が作成し、理事会の承認を受けなければならない。

分科会

第8条 分科会の事業は分科会会長が統括する。

- 2 分科会に分科会組織を設ける。その形態および運営は分科会において決定する。
- 3 分科会に関わる事務は分科会が処理する。
- 4 分科会における事業は次の事項とする。
 - (1) 磁気科学の各分科における学術の振興
 - (2) 磁気科学の各分科における本会会員の増員
 - (3) 学術集会の企画と実施

第9条 分科会の事業計画および予算収支は毎会計年度の開始前に分科会が起案し、理事会の承認を得なければならない。

- 2 前項に関りなく、緊急に必要とされる事業は、会長の承認の下に行うことができる。
- 3 分科会の事業実績および収支決算は毎会計年度の終了後に分科会が作成し、理事会の承認を受けなければならない。

年次大会

第10条 年次大会は理事会が決定した実行委員長の下に次の事項を実行する。

- (1) 年次大会の企画、準備、広報、実施
- (2) 年次大会のための実行委員会の構築
- (3) その他の年次大会実行に関わる諸事項

第11条 年次大会の事業計画および予算収支は、年次大会の開始前に実行委員長が起案し、理事会の承認を得なければならない。

- 2 前項に関りなく、大会開催に関して緊急に必要とされる事業は、会長の承認の下に行うことができる。
- 3 年次大会の事業実績および収支決算は、年次大会の終了後に実行委員長が作成し、理事会の承認を受けなければならない。

特設の作業部会

第12条 理事会は、第5条(1)-(7)以外の職務について必要に応じて理事会の下に特別の事項を担当する作業部会(以下、部会という)を設置することができる。

- 2 部会主査は、第5条(7)に基づき、会長が理事の中から指名する。
- 3 部会の運営に関する事項は別に定める規定による。

規則の改廃

第13条 本規則の改廃は理事会が行い、総会で報告する。

以上

日本磁気科学会 学会表彰規定

(2011 年 5 月 30 日理事会決定)

改訂(2017 年 3 月 30 日理事会決定)

第1条 (総則) 日本磁気科学会は、本会の賞を設け、本規定によって授与する。

第2条 次の3種の賞とし、毎年1回表彰する。

1. 優秀学術賞 賞状並びに記念品
2. 研究奨励賞 賞状並びに記念品
3. 功労賞 賞状並びに記念品

第3条 (優秀学術賞) 磁気科学分野において独創的かつ優れた研究業績を挙げた研究者に授与する。

第4条 (研究奨励賞) 年会において優秀な発表を行った若手に授与する。従来の、講演奨励賞・ポスター賞を引き継ぎ、その規定に従う。

第5条 (功労賞) 学会活動および磁気科学分野の普及に貢献した、あるいは当該分野で顕著な業績をあげた研究者に授与する。

第6条 (表彰の件数、人数) 優秀学術賞の授賞件数は毎年原則 1 件以内、功労賞は毎年原則 1 名とする。優秀学術賞の受賞者は 1 件につき複数名も可とする。

第7条 (選考委員会) 受賞候補者選考のため、表彰内規に従い選考委員会を設ける。委員は理事会の承認を得て、会長が委嘱する。

第8条 (受賞候補者の推薦) 会員(賛助会員を含む)は、優秀学術賞、功労賞の受賞候補者として適当と思う者を、選考委員会に推薦することができる。この場合は、自薦も認められる。

第9条 (受賞の決定) 選考委員会は、受賞候補者を選考し、会長に報告する。会長は理事会の議決により受賞を決定する。

第10条 (本規定の変更) 本規定の変更は理事会の議を経て行う。

附 則 この規定は2017年3月31日より実施する。

日本磁気科学会 年会における優良若手研究発表に対する表彰制度

2007/06/06理事会決定

賞の名称 : 研究奨励賞 (35歳以下)、学生ポスター賞

受賞対象者 : 以下の条件すべてを満たすもの

- 1) 日本磁気科学会 会員
- 2) 日本磁気科学会 年会で筆頭著者として研究発表を行なった者
- 3) 当該年会開催年度の4月2日時点で35歳以下の者(研究奨励賞)または、博士課程以下に在学する学生(学生ポスター賞)
- 4) 過去に該当する賞を受賞したことがないもの。

審査方法 : 講演発表申込時に、本人により審査希望の申請を受け付ける。その際、研究奨励賞については、本人に自身の発表する研究に関するアピール文を記入させる。

プログラム委員会が、1人の申請者につき、3名の審査員を日本磁気科学会会員の中から指名する。ただし、発表の共著者、申請者と同一機関に所属するものは、審査を行なうことができない。

各審査員は、提出された要旨、年会における申請者本人による講演について、定められた様式に基づき、審査・採点する。

なお、採点結果の提出は、年会終了後1週間以内とする。

採点結果は、表彰選考委員会にて集計し、授賞者を選考する。

表彰選考委員会メンバーは当該年会のプログラム委員長が指名する。

授賞者数は、発表申込件数に依存して、その最大数を決定する。

研究奨励賞、学生ポスター賞ともに、年会における全体の発表数50件につき1件の割合を最大数の目安として選考する。ただし、基準を満たすものが少ない場合には、その数を減じ、基準を満たすものがない場合は、授賞なしとする。

審査内容 : 要旨、プレゼンテーション、本人の寄与、研究の新規性、意義、質疑応答、総合評価。総合評価以外の各項目は5段階、総合評価は10段階で評価し、さらにコメントをつける。

受賞者の発表 : 表彰選考委員会で受賞が決定したものについては、学会発行のニューズレターに掲載することで発表し、賞状と副賞を郵送にて授与する。

その他 : 学生の発表であっても、特に優秀と認められる場合は、研究奨励賞の授与対象となる。

日本磁気科学会役員 (2017 ～ 2018)

役職	理事・監事(機関・職)
会長	山本 勲 (横浜国大院工・教授)
副会長(分科会統括)	大塚 秀幸 (物材機構・主席研究員)
副会長(事務局長)	安田 秀幸 (京大院工・教授)
支部長(北海道・東北)	淡路 智 (東北大金研・教授)
支部長(関東)	後藤 博正 (筑波大数物系・准教授)
支部長(中部)	田中 諭 (長岡技科大院工・准教授)
支部長(近畿)	堀井 滋 (京大院エネ科・准教授)
支部長(中国・四国・九州)	米村 弘明 (崇城大工・教授)
分科会長(物理化学)	奥村 英之 (京大院エネ科・准教授)
分科会長(高分子・材料プロセス)	伊掛 浩輝 (日大理工・准教授)
分科会長(無機・金属)	鈴木 達 (物材機構・グループリーダー)
分科会長(有機・バイオ)	井原 一高 (神戸大院農・准教授)
分科会長(分離・分析)	飯國 良規 (名工大工・助教)
分科会長(磁場発生)	大塚 秀幸 (物材機構・主席研究員)
特定事項(国際会議)	安藤 努 (日大生産工・教授)
特定事項(国際会議)	諏訪 雅頼 (阪大院理・助教)
特定事項(産学連携)	杉山 敦史 (吉野電化工業 株式会社)
特定事項(産学連携)	玉川 克紀 (株式会社 玉川製作所)
特定事項(産学連携)	木村 亨 (ポリマテック・ジャパン株式会社)
特定事項(産学連携)	牛島 栄造 (株式会社 アイシンコスモス研究所)
特定事項(産学連携)	渋谷 和幸 (JASTEC、ソリューション推進部)
事務局委員会(財務)	廣田 憲之 (物材機構・主幹研究員)
事務局委員会(広報)	三井 好古 (鹿児島大院理工・准教授)
事務局委員会(企画)	茂木 巖 (東北大金研・助教)
監事	尾関 寿美男 (信州大理・教授)
監事	掛下 知行 (阪大院工・教授)

日本磁気科学会 2018 年 物理化学分科会

「界面現象や生体に関わる磁気科学」

講演概要集

於：京都大学国際科学イノベーション棟

2018 年 9 月 1 日（土）

主催： 日本磁気科学会

共催： 応用物理学会 磁気科学研究会

環境やエネルギー、医療分野などにおける磁気科学は、今後更なる発展が期待されています。またこれらの分野研究では飛躍的な進歩が求められており、基礎的な知見を得る事も含めて21世紀における今後の我々の社会発展とも関わる重要事項と考えられます。2018年の日本磁気科学会物理化学分科会では上記も踏まえ、界面現象や生体に関わる磁場効果に関して、4名の演者にご講演頂く事となりました。皆様には活発なご議論をお願い申し上げます。(講演会後の懇親会にも是非ご参加下さい。)

日本磁気科学会
2018年 物理化学分科会長(世話人)
奥村英之

目次

- 13:05 はじめに
奥村英之(京都大学)
- 13:10~14:00 「ポルフィリン化合物の光磁気化学」
石井和之(東京大学)
- 14:00~14:50 「界面が介在する磁気現象—吸着, 反応, 晶出」
尾関寿美男(信州大学)
- 休憩
- 15:10~16:00 「ナノ粒子ならびにソフトマターの磁場特性を活用した
生体分子の分離法」
岡本行広(大阪大学)
- 16:00~16:50 「生体系を取り巻く多様な条件を磁場効果観測に生かす」
岩坂正和(広島大学)
- 17:00 閉会

=====

懇親会: 17時過ぎ頃より(南禅寺『順正』にて)

ポルフィリン化合物の光磁気化学 Photomagneto-chemistry of Porphyrinic Compounds

°石井和之（東大生研）
°Kazuyuki Ishii (IIS, UTokyo)
E-mail: k-ishii@iis.u-tokyo.ac.jp

Abstract:

Functionalization of molecules is one of important subjects for not only developing technological applications but also pioneering novel scientific fields, because of recent explosive increases of chemicals. Thus, we have developed various molecule-based functions, such as photocontrol of magnetic properties and spin-based fluorescence probes, as well as novel scientific observations of magneto-chiral dichroism of organic compounds. I'll present recent topics especially from the viewpoint of photomagneto-chemistry of porphyrinic compounds.

Keywords: excited multiplet states, fluorescence imaging, magneto-chiral dichroism, magneto-optical memory

1. はじめに

近年、分子性物質科学分野は目覚ましい発展を遂げている。例えば、合成・分離精製技術の発展により、数多くの分子が新規に合成され、他方、これらの物性測定法や量子化学計算も、大きく進歩してきている。原子レベルで精密に性質を制御できる分子の利点を鑑みると、これら物質群を積極的に機能・技術へ具現化することは、今後の科学技術における最重要課題の一つといえる。

以上のような考えのもと、石井研究室では、膨大な新規分子・新規分子物性に対し、新機能・価値・分子設計柔軟性等を付加することで、分子機能の開拓に取り組んできた。また、サイエンスを行う際には、面白かった！と思えるサイエンスであることを心掛けて新規分野の開拓に取り組んでいる。本講演では、我々が取り組んでいるポルフィリンの光磁気化学に関する以下の研究成果について紹介する。

2. 光励起多重項状態の科学と機能

光励起多重項状態の観測^{1,2} 励起三重項色素－常磁性種間相互作用は、励起状態の消光等の重要な現象を与えるが、励起三重項色素と常磁性種の対（光励起多重項状態）の性質は明らかにされていなかった。従来、基底状態で不對電子スピンを持つ常磁性化合物の光励起状態に関する時間分解 EPR (TREPR) 研究はほとんどなかったが、常磁性錯体 ZnTPP-nitpy (Fig. 1) に TREPR を適用し、剛体溶媒中の励起二重項 (D_1)、励起四重項 (QA_1) を観測することに初めて成功した。また、 QA_1 TREPR スペクトルのシミュレーション法を確立し、常磁性化合物の新規評価方法を提示した。

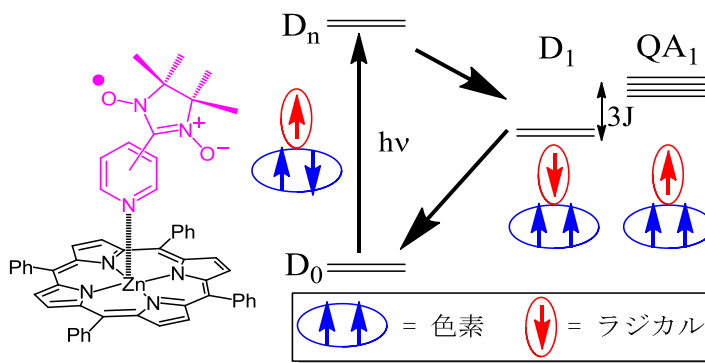


Fig. 1 ZnTPP-nitpy and its excited multiplet states

磁気的性質の光制御^{3,4} TEMPO ラジカルと共有結合したケイ素フタロシアニン (R2c, Fig. 2) において、光励起多重項状態からの選択的失活により、基底状態の磁気的性質が変化することを見出した。この光励起多重項を利用した新現象は、従来の機構とは原理的に異なる磁気的性質の光制御に関する新規概念であり、スピン光科学の新しい可能性を提示した。

ビタミン C 検出用蛍光プローブの開発^{5,6} 近年ビタミン C は、副作用のない抗癌剤として期待されており、その生体内機能解明のために、ビタミン C 蛍光バイオイメーキング技術の開発が期待されている。R2c を用いて、ビタミン C 検出用蛍光プローブを開発した。この蛍光プローブのビタミン C 検出機構は、以下の通りである。①R2c におけるフタロシアニンの蛍光は、TEMPO ラジカルにより消光され

る。②ビタミン C との反応後、ラジカルスピンの消失により、フタロシアニンに由来する強い蛍光が観測される。また、フタロシアニン系蛍光プローブの利点として、励起光、発光 (700nm 付近) が、生体組織透過性が高い赤色光であることが挙げられる。R2c をマウス全体へ分布させた後、ビタミン C を投与したところ、短時間でマウス全体、特に腸、肝臓付近において蛍光強度増大が観測された。これより、マウス中のビタミン C を蛍光バイオイメージングすることに初めて成功した (Fig. 2)。これらの結果は、高濃度ビタミン C 点滴療法に対する重要な知見になり得ると考えられる。

3、分子磁気光学効果の科学と機能

分子磁気光学メモリ^{7,8} 分子の軌道角運動量には、金属イオン固有の d, f 軌道とともに、 π 電子軌道も寄与できるが、無機磁性体とは異なり、室温で磁気ヒステリシスを付加することは困難であった。磁性基板上にフタロシアニン薄膜を作製することで、フタロシアニン分子の強い磁気光学効果に、室温で磁気ヒステリシスを付加することに成功した。次に、ナノ秒パルスレーザーを用いて、フタロシアニン由来の吸収帯を選択的に照射したところ、基板由来の MCD 信号強度が減少すること、すなわち、外部磁場印加と光照射により MCD 信号を ON/OFF できることを見出した。以上の結果より、分子の種類 N に対して 2^N 個の情報記憶が期待出来る、新規分子磁気光学メモリを考案した。

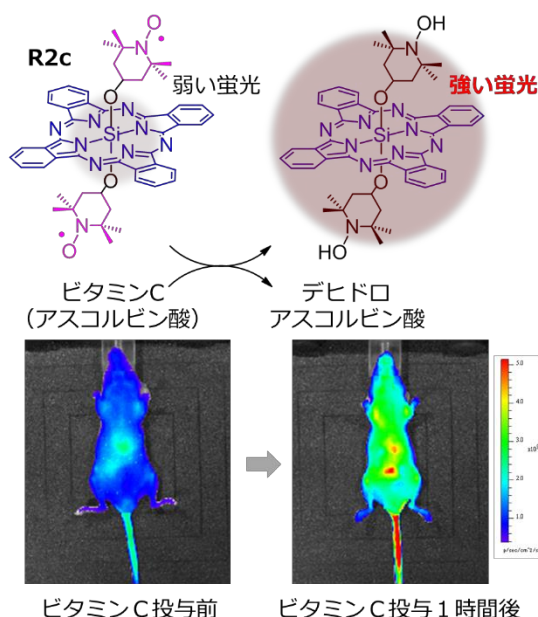


Fig. 2 Fluorescence images of Vitamin C in a mouse using R2c

有機化合物の磁気キラル二色性^{9,10} 生物を構成するアミノ酸は、片方の鏡像異性体の L 体のみである。これを生命のホモキラリティーと呼び、生命の起源に関わる未解決の難問である。磁気キラル二色性 (光学活性分子の光吸収が磁場の方向によって変化する現象) は、磁場中の光化学反応により片方の鏡像異性体の過剰を生み出すことができるため、地球の惑星運動による渦運動や円偏光による光反応とともに、生命のホモキラリティー起源の候補として考えられている。しかし、金属を含む化合物においてのみ観測されており、生命を構成する有機化合物における観測例はなかった。我々は、大きな π 電子軌道角運動量を有するポルフィリン分子同士が捻れた配置となるキラル J 会合体を用いることで、有機化合物における磁気キラル二色性を初めて観測することに成功した。さらに、光合成において光を捕集するクロロゾームのモデル化合物、亜鉛クロリン錯体についても磁気キラル二色性観測に成功した。これは光合成における新規磁場効果の存在を示唆しており興味深い。

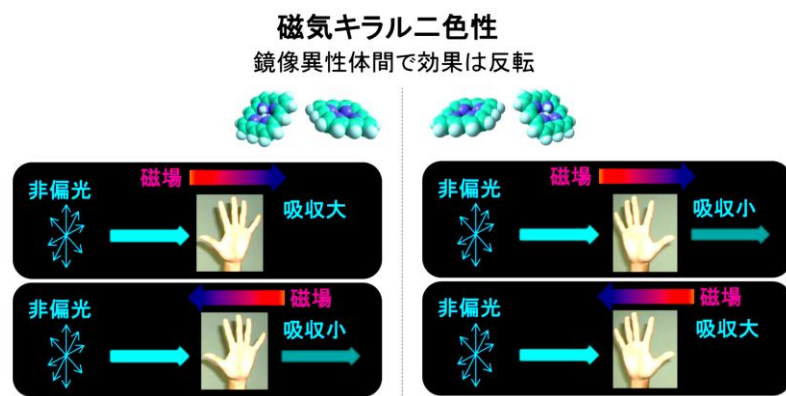


Fig. 3 Magneto-chiral dichroism

参考文献

- [1] K. Ishii, J. Fujisawa, Y. Ohba, and S. Yamauchi: *J. Am. Chem. Soc.*, **118**, 13079-13080 (1996).
- [2] K. Ishii, J. Fujisawa, A. Adachi, S. Yamauchi, and N. Kobayashi: *J. Am. Chem. Soc.*, **120**, 3152-3158 (1998).
- [3] K. Ishii, Y. Hirose, and N. Kobayashi: *J. Am. Chem. Soc.*, **120**, 10551-10552 (1998).
- [4] K. Ishii, Y. Hirose, M. Fujitsuka, O. Ito, and N. Kobayashi: *J. Am. Chem. Soc.*, **123**, 702-708 (2001).
- [5] K. Ishii, K. Kubo, T. Sakurada, K. Komori, and Y. Sakai: *Chem. Commun.*, **47**, 4932-4934 (2011).
- [6] T. Yokoi, T. Otani, and K. Ishii: *Scientific Reports*, **8**, 1560 (2018).
- [7] K. Ishii and K. Ozawa: *J. Phys. Chem. C*, **113**, 18897-18901 (2009).
- [8] M. Karasawa and K. Ishii: *J. Phys. Chem. C*, **120**, 21811-21817 (2016).
- [9] Y. Kitagawa, H. Segawa, and K. Ishii: *Angew. Chem. Int. Ed.*, **50**, 9133-9136 (2011).
- [10] S. Hattori, Y. Yamamoto, T. Miyatake, and K. Ishii: *Chem. Phys. Lett.*, **674**, 38-41 (2017).

界面が介在する磁気現象—吸着、反応、晶出 Magnetic Phenomena via Interfaces—Adsorption, Reaction, and Crystallization

尾関寿美男 (信州大学理学部)
Sumio Ozeki (Shinshu University, Faculty of Science)

E-mail: sozeki@shinshu-u.ac.jp

Abstract:

Magnetic phenomena via interfaces should be complex, but bring about unexpected functions and structures, because interfaces or colloidal materials may change their electronic states to lead to properties sensitive to magnetic fields. In this talk, the molecular adsorption and reaction on solid surfaces and colloidal structure formation under magnetic fields will be given as interesting examples.

1. はじめに

弱磁性物質と強磁場との相互作用を基盤として、材料プロセス、構造・物性・機能制御、新現象・新機能発現を中心に据えた新学問領域を磁気科学と称している^{1),2)}。そのための最適な磁場の創出のための磁石開発、磁場中で磁気科学を展開するための周辺デバイスの構築なども含まれる。化学における未利用エネルギーとしての磁場に目が向けられたことや、利用しやすい無冷媒型超伝導マグネットが開発され、10T 級の磁場が一般研究室で利用できたことが磁気科学展開の推進力になった。磁場による非磁性物質の構造制御や物性・機能制御は熱力学的には容易ではないので、強磁場を利用した明確な結果に基づいて磁場効果を見極め、低磁場への展開を図るとともに、さらに強い磁場における新しい科学を探索する戦略がとられていたが、実際には低磁場や更なる強磁場への展開は多くはない。我々も、漸くここ数年水の磁気処理研究で永久磁石を用いて低磁場効果を検討し始めているに過ぎない。

1990 年頃に始まる黎明期から 30 年余りが経過し、多くの興味ある現象が発見されて基礎科学的検討を終え、新たに展開を模索する段階に入っている。これまでの基礎的成果を踏まえて、新しい切り口や対象の探索、磁場の時空制御などのデザイン磁場へと応用展開が図られつつある。顕著な展開としては、回転磁場などの変調磁場が磁場の可能性を上げ、低磁場という観点からも大きな成果をもたらしている。パルス磁石によるパルス磁場系列や静磁場中を時系列で潜らせるパルスの磁場の可能性は未知であるが、興味深い。

コロイド系の配向エネルギーは磁気エネルギーのオーダーなので、最も有望なターゲットになっている。また、界面現象は界面が特異な構造・電子状態をもち、少集団が支配する世界なので、磁場は極めて有効である。脂質分子の磁場配向を経由した膜構造への磁場効果として、サブミクロンの球状膜構造であるベシクルの磁場融合・分裂によるサイズ分布や分子膜透過の制御、膜電位の磁場応答と分子センサーへの展開が試みられている。10T の磁場を ON-OFF して体積相転移ゲルへの低分子吸・脱着を誘起して可逆的に極めて大きく体積を変化させた。その他、 $\text{Cu}_2(\text{pzd})_2(\text{pyz}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (CPL-1) の合成条件に 6T の磁場印加のみで組成まで変化させた $\text{Cu}_2(\text{pzd})(\text{pyz}) \cdot \text{ClO}_4$ 結晶を誘起した珍しい例もある。表面層は磁気的にも特殊であるので分子吸着は外部磁場によって鋭敏に変化し、吸着平衡を磁場制御できる。金電極表面上の脂質膜のトンネル電流³⁾や SmCo_5 粉末上のシクロヘキセンへの水素トンネル反応にも外部磁場は影響する。このように、界面やコロイド系は磁場に鋭敏で、磁気界面コロイド化学でくられる一群をなしつつある。

2. 界面での磁気現象

固体表面上での水素のオルト/パラ (o/p) 変換は、常磁性中心の不均一磁場が水素分子との衝突の間に 2 つの水素原子核スピンに異なった影響を与えるために起こる (Wigner 理論)。遷移金属酸化物や希土類金属酸化物上での水素の o/p 変換は金属イオンの d 電子や f 電子の数と良い相関にある。常磁性酸化物上での o/p 水素変換の反応速度は実効磁気モーメントの 2 乗に比例し、Wigner 理論に矛盾はしない。固体表面と分子との相互作用への外部磁場効果は、1968 年にこの変換反応が固体表面上で外部磁場によって促進または抑制されることが報告され、水素核と表面上の常磁性中心との相互作用がその一因と推定された。その後、この方面の進展はなかったが、1987 年から 90 年の間に、異なる観点からの固体/分子相互作用への磁場効果が相次いで発表された：金属水素化物と水素との間の化学平衡の磁場移動、

SnO₂ 上の水素／酸素反応への磁場効果、分子吸着への磁場効果。

1950 年代から Selwood らが吸着に伴う磁化の減少を利用して、分子の金属微粒子への化学吸着（化学結合）を研究していた。この過程は磁場中ではエネルギー的に不利なので、外部磁場によって原理的には吸着が抑えられるはずである。しかし、吸着エネルギーが 10kJ/mol に及ぶような吸着平衡を磁場によって制御するのは困難である。物理吸着における磁場効果は、吸着相の磁化変化や固体／分子間の電子の偏りなどのために必ずしも吸着抑制に限られない。静磁場は量子力学的・熱力学的効果（直接効果）と物質移動による濃度効果・速度論的效果や配向効果（間接効果）を及ぼす。固体表面の近傍では表面磁性やダングリングボンドのような欠陥のために局所磁場による不均一さが生じる。したがって、外部静磁場が均一るときでさえ、固体表面と分子との相互作用には不均一磁場による重ね合せの効果が現われる。

固体表面への分子吸着は細孔や表面の欠陥、官能基に大きく依存し、吸着状態あるいは吸着種が変化する。物理吸着した分子の吸着状態は吸着量あるいは吸着ポテンシャルとともに変わる。固体表面上の吸着第 1 層中の分子は比較的強く固体表面と相互作用し、少なくとも第 2 層や多分子層中の分子とは構造的、運動論的に区別される。また、2 nm 以下の細孔中にマイクロポアーフィリングした分子や 2 nm 以上の細孔に毛管凝縮した分子とも区別される。分子が化学吸着する場合には、固体の吸着サイトの種類に依存して吸着種が異なり、吸着に際して不可逆的に磁化が変化する。このような分子吸着の吸着エネルギーは物理吸着でさえ数 kJ/mol であり、磁場のように小さなエネルギー摂動が分子－固体相互作用に影響するとは考えにくい。

温度 T K で吸着平衡にある気体／固体系 ($p: H=0$ での平衡圧) に磁場 H をかけたときの磁気吸着に伴う圧力変化が Δp 、磁場 H のもとで 1 モルの分子が吸着するときの磁化の変化を ΔM とすると、 $p \gg \Delta p$ である実験条件を考慮して展開すると、

$$\Delta p/p = -\Delta MH / RT$$

と近似される。 Δp は ΔM あるいは磁化率の変化および H 依存性によっていろいろな磁場強度依存性を示す。

吸着に伴う磁化変化が起こらない場合でも、勾配磁場中では分子が輸送され、吸着量が変わる場合がありうる。77K で O₂ は 7T 以下の磁場でゼオライト 5A や活性炭素繊維 A10 に磁気吸着する。これらの吸着媒に酸化物超電導体 (YBa₂Cu₃O_x) 粉末を混合すると、10T 以下の磁場によって磁気脱着するようになる。磁化測定によると、用いた YBa₂Cu₃O_x の臨界磁場は 77K で 8～10T にある。したがって、この条件では超電導体は完全反磁性状態にあり、超電導体内部からはじき出された磁束は吸着媒のマイクロポアーに局所磁場勾配をつくる。この勾配磁場は酸素分子に細孔外に向かって力が働きうる。粗い見積もりによると、マイクロポアーの直径が 0.52nm であれば、10T の磁気力で吸着ポテンシャルから脱出できる。

吸着分子は吸着分子間および固体との相互作用および凝縮相形成を通じて磁氣的性質を変え、磁場に応答するように見える。磁気吸・脱着を吸着分子の磁化の変化によって説明するには、吸着相のなかにバルク相とは異なる磁気状態を想定しなければならない。現状では各吸着系に特有な問題を含み、現象的にも統一的に整理されていない。吸着への磁場効果は、固体表面／分子相互作用における磁氣的相互作用を反映しており、磁場による分子／固体相互作用制御の素過程として重要である。

3. まとめ

磁気界面コロイド科学は、現在「磁場下での界面コロイド科学」に過ぎないが、熱力学界面効果に加えて、界面エネルギーを下げるための表面の再構成を伴うために界面の電子状態が変化し、現状では予測できない磁気現象が起こりうる。界面付近での量子科学効果が顕著な界面を介した磁気制御系としての「磁気界面コロイド科学」が期待される。

参考文献

- [1] 北沢宏一監修, 尾関寿美男, 谷本能文, 山口益弘編著, “磁気科学”, アイピーシー, 2002.
- [2] M. Yamaguchi and Y. Tanimoto, e., “Magneto-Science”, Kodansha-Springer, 2007.

ナノ粒子ならびにソフトマターの磁場特性を活用した 生体分子の分離法

○岡本 行広 (大阪大学大学院 基礎工学研究科)

°Yukihiro Okamoto (Grad. Sch. of Engineering Science Osaka University)

E-mail: okamoto@cheng.es.osaka-u.ac.jp

Abstract:

A novel separation method has been demanded to attain sustainable, safe and reliable society. Among various separation methods, a microspace separation is one of the candidates to realized such a society. However, there still have several problems in microspace related to the construction of separation field and detection. In addition, for further higher performance in microspace, a novel stationary phase should be developed and the control of molecular interactions between stationary phase and target molecules is also significantly important.

To overcome these problems, separation methods utilizing magnetic force were developed and enabled an easy construction of stationary phase and an optimization of chiral separation. Furthermore, these methods attained high sensitive detection and selective separations. In addition, magnetic force enabled control of molecular interactions between liposomes as a stationary phase by altering liposome structure and properties.

Thus, my developed methods utilizing magnetic force would be useful for higher performance separations.

Keywords: lipid nanotechnology, microspace, multi-functional magnetic nanoparticles, separation

1. 研究背景

持続可能な社会・安全安心な社会の構築が言われて久しい。そして、これを実現するためには、分離技術の発展は必須項目である。事実、医療における早期診断、有害物質のその場検出などは、現状よりも優れた分離性能が必要である。

そこで、近年、注目されているのが、マイクロメートルサイズの空間を分離場とする電気泳動法(キャピラリー(CE)・マイクロチップ(MCE)電気泳動法)である。分離場のサイズがマイクロメートル以下まで極小化すると、熱交換効率がよい(高い電圧を印加し、高速分離が可能となる)、流れが栓流(バンドの広がりを抑制し、高い分離能を達成可能)であるなど、分離に好ましい特性をマイクロ空間は有する。これらの特性を利用し、CE/MCEはDNAをはじめとする生体試料の分離分析に多大な貢献をしている。

さらに、分離性能の向上のために、電気泳動とクロマトグラフィーのハイブリッド方法は有望である。この場合、分離性能の鍵の一つは固定相(分離場)であり、分離場と分離対象物質との相互作用を自在に制御可能となれば、分離性能の向上が期待できる。

本講演では、『微小分離場の特性を活用する分離科学(Fig. 1)』を提唱し[1], 研究を実施している私の成果の中で、磁場を活用した分離の研究をもとに、分離における磁場の有用性について概説したい。

2. 微小分離場での多機能性磁気ナノ微粒子の活用による分離の高性能化

従来法と比較し、数多くの利点を有するにも関わらず、CE/MCEは汎用されるに至っていない。これは、微小空間では、(i)望ましくない相互作用が顕著(非特異的吸着など)となる場合があり、分離効率が低下する。(ii)微小空間内での分離場構築に高度な技術が必要であり、最適条件を見出すのが困難な場合がある。(iii)濃度感度が低いため、検出不可の場合がある。という問題をCE/MCEが有しているため

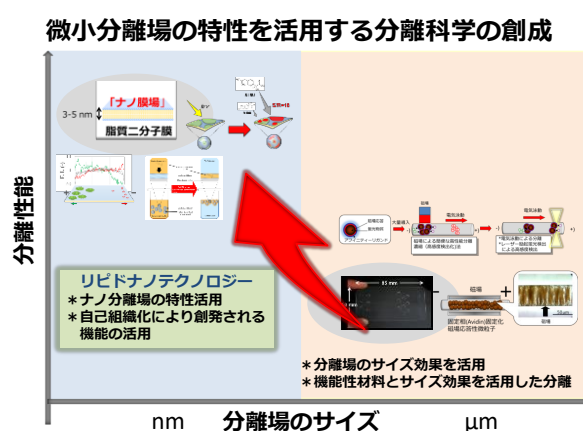


Fig. 1. 分離科学における研究戦略図

である。そこで、磁場・磁場応答性多機能性微粒子を活用する分離法が、これらの問題に対して有効であることを実証している[2,3]。アビジン（キラルセクター）を固定化した磁気微粒子を利用すると、アビジンの構造を維持したまま、充填される微粒子の量・充填長を磁場で容易に調整可能であり、キラル分離の最適条件を短時間で見出すことが可能であった。また、分離において重要な再現性に関しても良好であり、本手法は、実用に供することが可能な性能であった。すなわち、磁場と磁気微粒子の併用は、微小空間での分離場構築のひとつの指標となりうるものである。さらに、磁場応答性・蛍光・アフィニティリガンドを有する多機能性磁気微粒子と磁場との併用による分離法を開発し、高感度検出・高選択的分離法を開発している（Fig. 2）。本手法は、特異的相互作用により、目的とする特定の物質のみが多機能性磁気微粒子に結合し、蛍光標識化（高感度化）される。その後、試料の大量導入・磁場の印加で、多機能性磁気微粒子に結合した目的物質のみが濃縮（高感度化・高選択的分離）され、その後、磁場の除去により高感度検出が達成される手法である。本手法は、自動化可能な簡便な操作方法でもあるため、ハイスループット解析への適用が期待できる。

これらの研究は、微小分離場において、磁場と磁場応答性物質の併用は分離の高性能化に有用であることを実証するものである。また、磁場応答性微粒子の表層を変えるのみで様々な分離対象物質に適用可能なため、今後、様々な試料への利用が期待される。

3. 磁場によるソフトマター（脂質ナノ膜場）との分子間相互作用の制御法

脂質分子の自己組織化で形成される脂質ナノ膜場は分離場として優れた特性を有している。そして、この脂質ナノ膜場の特性と自己組織化により創発される機能を活用した分離法を『リポドナノテクノロジー』と提唱し、研究を実施してきた[4, 5]。しかし、さらなる高性能な分離を達成するためには、分離過程において、脂質ナノ膜場との相互作用（吸着・脱着）を制御する技術が必須となる。ところで、脂質ナノ膜場は、疎水性相互作用に基づく自己組織化膜であるため、弱い外部場であっても、大きな構造そして物性の変化を生じると考えられる。そして、この構造・物性変化により、脂質ナノ膜場との相互作用も制御可能であると考えられる。この仮説を実証するため、磁場強度と膜物性の相関性、アミノ酸の吸着量・吸着速度を評価した結果、磁場により膜構造ならびに物性の変化を誘起し（Fig. 3）、吸着量・吸着速度の増加を達成した。また、磁場のオン/オフにより吸着量の促進ならびに脱着に成功した。さらに、磁場と第3物質の添加により、脂質ナノ膜場のアミノ酸に対するキラル認識能の向上を達成した[6]。

このように、脂質ナノ膜場の特性と磁場の活用により、脂質ナノ膜場との相互作用の制御が可能であり、現在、磁場と脂質ナノ膜場（ソフトマター）を活用した流れ系分離を検討しているところである。

参考文献

- [1] Yukihiro Okamoto, *Chromatography* **2018**, 39, 1-6
- [2] Yukihiro Okamoto, Yukari Ikawa, Fumihiko Kitagawa, Koji Otsuka, *J. Chromatogr. A*, **2007**, 1143, 264-269
- [3] Yukihiro Okamoto, Fumihiko Kitagawa, Koji Otsuka, *Anal. Chem.*, **2007**, 79, 3041-3047
- [4] Yukihiro Okamoto, Yusuke Tsujimoto, Hiroshi Umakoshi, *Electrophoresis*, **2016**, 27, 1031-1040
- [5] Yukihiro Okamoto, Yusuke Kishi, Keishi Suga and Hiroshi Umakoshi, *Biomacromolecules*, **2017**, 18(4), 1180-1188.
- [6] Yukihiro Okamoto, *et al. submitted*

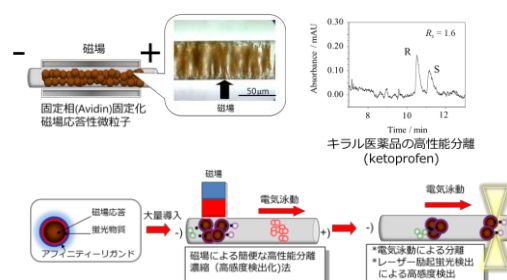


Fig. 2. 磁場と多機能性微粒子の併用による高性能分離法

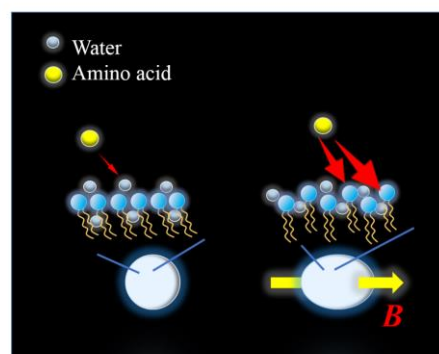


Fig. 3. 磁場による脂質ナノ膜場構造・物性の変化の誘起そして相互作用の制御

生体系を取り巻く多様な条件を磁場効果観測に生かす Observation of Magnetic Field Effects Featuring Diversity of Biological Systems

°岩坂正和（広島大学）
°Masakazu Iwasaka (Hiroshima Univ.)
E-mail: iwasaka@hiroshima-u.ac.jp

Abstract:

Magnetic field effects can be observed in both physical-chemical and biological systems where a common mechanism may control the observed phenomenon. Usually a biological system contains miscellaneous parameters (conditions) which were evolutionally selected for the purpose of survival of a living creature. The biological function should be exhibited for a specific purpose, such as utilization of sunshine in nature world. We know that normal (and traditional) research should be carried out on a proper material for aim of proper field. But if we test a preliminary response of a biological material to applied magnetic field, we may have a chance to encounter a new magnetic field effect. In this paper, some evidence of quick response of bio-photonic materials to external magnetic fields is summarized.

Keywords: magnetic field effect, biological material, bio-photonic material, guanine crystal

1. はじめに

物理化学プロセスと生物系に対する磁場効果を比較した場合、共通する素過程・素反応が多く存在する一方、生物系において磁場効果を観測するほうが効率的に新規磁気現象をみいだす場合があるかもしれない。合目的的に機能するように進化の過程で形成された生体システムにおいて、人工システムに比べ、もし磁場の作用が顕在化するチャンスが多くなるとすれば、あらかじめ用意されたパラメータが多くまた広くスクリーニングされる幸運が、磁場効果観測の成功に導くのであろう。しかし、その観測が本当に科学的真実であったかどうかの証明に成功したかどうかにも重要である。

磁気科学分野では、磁場効果観測の科学的真実性を担保する上で、「磁場中でのリアルタイム観測」、すなわち磁場中に見る、ということが大事にされてきたと思われる。目の前に存在するものは、疑いのようなない科学的真実である。ここでは、生体を取り巻く多様な条件のなかで光を利用する生物がもつ光機能物質の挙動に着目した。太陽光を有効利用する生物の光機能を活用した磁場効果観測の高感度化について述べる。

2. 見たいものと見えたものが違った観測例 ～魚の鱗で硬組織を制御する細胞と、光を制御する細胞内オルガネラを勘違い～

生体高分子の磁場配向研究は 1980 年頃から盛んになってきた[1]。1990 年代には細胞外マトリックスのひとつであるコラーゲンを磁場配向させたシート上での磁場配向技術も登場した[2]。この研究潮流において、コラーゲンを分泌する細胞の一種である骨芽細胞の骨形成機能に対する磁場効果の報告もなされた[3]。

骨芽細胞とともに骨形成を制御する破骨細胞を、骨芽細胞と共存培養させつつ磁場効果を観察する試行実験をわれわれは行った。また、骨形成のモデル系として金魚の鱗を用いた骨形成に対する磁場効果研究（交流磁場影響）も行われてきた[4]。

筆者は、金魚の鱗を培養液中にて 5 テスラ (T) 磁場を印加しつつ、骨芽細胞および破骨細胞の挙動をリアルタイム観察する実験を 2006 年頃に行った。観察に用いる照明光を明視野モードで用いた場合、長時間録画した映像の高速再生により、金魚の鱗表面の骨芽細胞および破骨細胞の動きがみられた。ところが、暗視野モードでは全く別の生物由来の構造体が、その鱗表面に存在しブラウン運動により数 Hz 以上の振動を示す様子が観測された。暗視野照明光をこの構造体は強く反射し、ブラウン運動によりキラキラした明滅（フリッカリング）を生じた。さらに、磁場印加によりこの構造体の光反射は顕著に抑制された[5]。

当初、その磁場効果観察の対象であった金魚鱗の骨芽細胞・破骨細胞に比べ、この構造体（板状の有機結晶）は、はるかに顕著な磁気応答を光反射のかたちで示すことが明らかとなった[6,7,8,9]。この板状結晶は、DNA の塩基のひとつであるグアニン分子が水素結合により 2 次元平面内で平行に結合したレイヤーが、a 軸方向へ重なったもの（グアニン結晶板）である。

このグアニン結晶内では特段ラジカル等の常磁性による磁化率への寄与分はなく、ベンゼンやグラファイト、グラフェンと同様 π 電子系の反磁性磁化率の顕著な異方性によって磁力線に平行に分子が並ぶことが配向（磁場中での回転運動）の原因と考えられる。

グアニン結晶板は、多くの魚類、両生類・貝類やプランクトンの一部、そして陸上動物の一部（カメレオン[10]）において、体表や眼、そして深海魚の発光器の光機能発現に役立っていると考えられている。魚類の場合、体表（鱗の裏側）色素胞とよばれる細胞オルガネラの内部において、bio-crystallizationのプロセスを経て形成されると考えられているが、その遺伝的情報や生体内結晶化プロセスの詳細は現在も十分に解明されていない。

以上の観測例は、「磁場中に見る」という実験スタイルが、可視光の制御に特化した生体組織・成分の磁気応答の検出を導いた例であるといえる。また、このグアニン結晶という生体成分が非常に軽く、水溶液中で高速のブラウン運動振動を生じる条件も、磁場応答を気づくのに有効であるといえる。

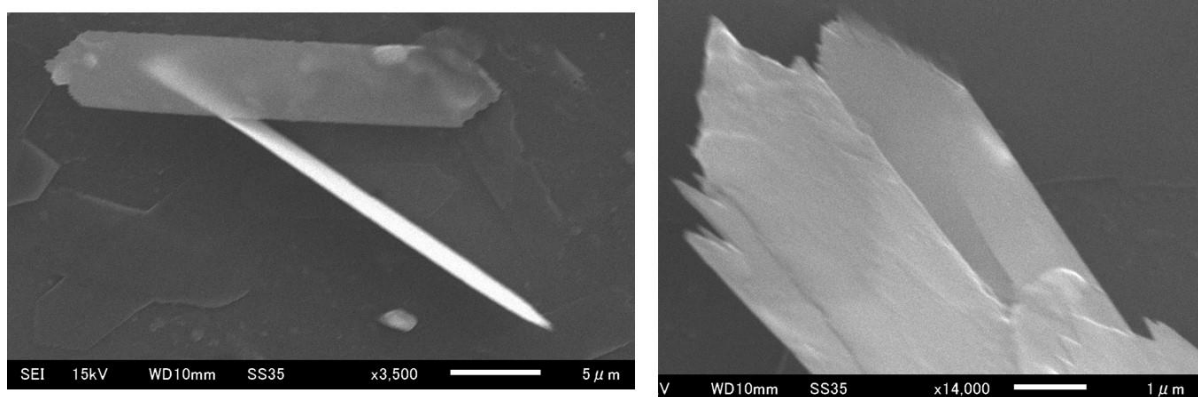


Fig.1. SEM images of guanine crystal platelets of goldfish.

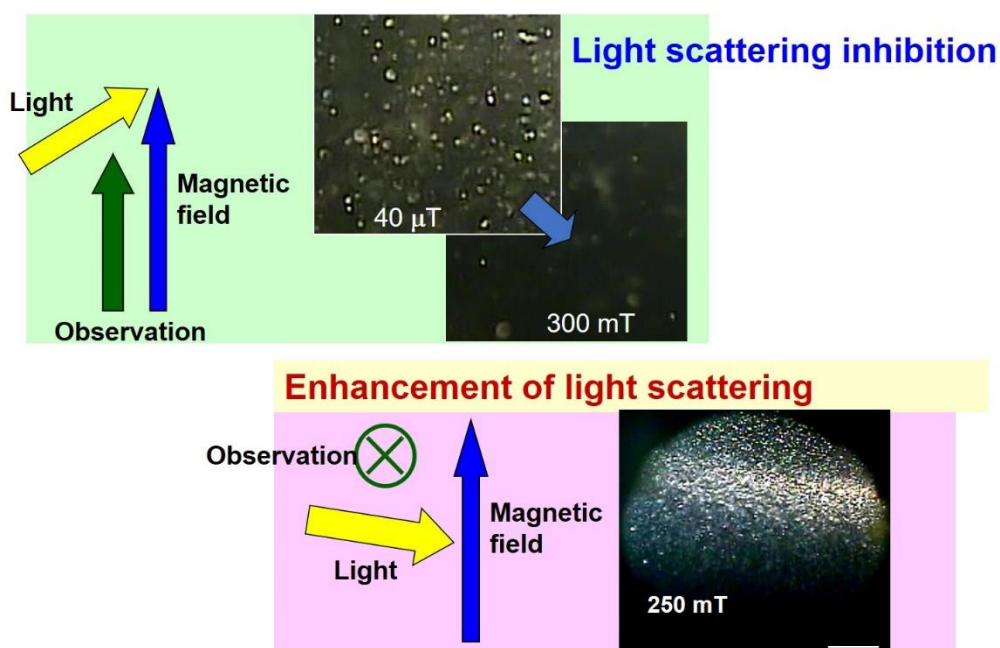


Fig.2. Magnetic responses of light scattering by guanine crystal platelets floating in water.

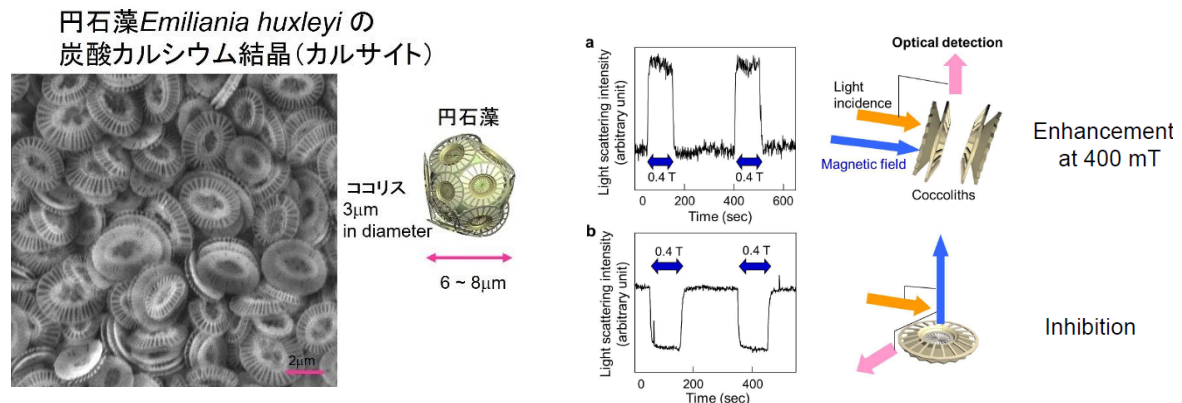


Fig.3. Coccolith discs of *Emiliania huxleyi* (left panel) and light scattering anisotropy detected by magnetic orientation of coccolith discs (right panel).

3. 光応答に特化した生体組織の磁気応答

仮に、可視域近傍の光を用いた磁場中観察において、磁場オン・オフによる観察対象の光学的挙動の相違が顕著になるのであれば、生物進化の過程で光合成に関与した生体材料・構造体の磁気応答を磁場中で観察してはどうだろうか？光合成に関与するクロロフィルの光吸収スペクトルを磁場中で観察（分光学的に計測）した例は先行研究に多い。ここでは、光合成微生物である微細藻類の一種である円石藻が bio-crystallization (bio-mineralization) のプロセスを経てつくる、炭酸カルシウム製の微結晶：円石 (coccolith) の磁場中での光学特性についても紹介する。

円石は直径3ミクロン前後程度の直径をもつ円盤である。球形の植物細胞内で形成され、表層に移動し湾曲した円盤状構造体は、現在の MEMS 等の微細加工技術や3D 光造形技術で未だ到達できていないと思われる、100nm の空間分解能でしかも3次元的に数ミクロンの厚みをもつ固体の構造体である。われわれは当初、細胞表面に複数の coccolith が付着した状態で最大5T の磁場を印加しつつ、水中に浮遊した円石藻全体の構造色変化をとらえた。炭酸カルシウム結晶のナノパーツで組み合わされた円盤の反磁性的な磁気回転による可能性が示唆された[11]。

次に、分離した coccolith 円盤を水中に浮遊させ、観察対象に対する入射光および磁力線の方向と、反射光強度との関連を調べた[12]。coccolith が Mie 散乱を起こす際の散乱断面積を考慮し、この coccolith 円盤の直径方向が磁力線に垂直になるような磁場配向が起こったと推察した。現在の化石燃料を産生した張本人といわれる円石藻が、太陽光を有効利用するため、「この炭酸カルシウム製の円盤を、日傘として使ったのか、集光レンズとして使ったのか？」過去半世紀以上の議論がある。われわれの磁場中観察結果は、この coccolith が、太陽光を適度に調整するために日傘およびレンズの双方の機能を有することを示唆するものである。

前述のグアニンは、魚等の生物学的ディスプレイ、カモフラージュを行うための光機能物質であることは確かと思われる。昨今のメタマテリアル・フォトニック結晶の研究動向と比較すれば、生物進化の過程でデザインされた生物光学素子のなかに、バイオ・フォトニック結晶のみならず、メタマテリアルを発見することも可能かもしれない。光クロッキングを起こす生体材料が存在する可能性は、自然界の生物の構造色や光反射挙動を観察することで今後明らかになると思われる。（その場合、メタマテリアルの用語の定義となった、(後・自然学：メタ・フューシス) の意味合いを再検討しないとならなくなる。）

筆者らは、最近、この魚のグアニン結晶に加え、イカのリフレクチンやクシクラゲのマイクロチューブス（微小管）など、タンパク質の複合体による光干渉効果の磁場中観察を行ってきた。これらの反磁性生体材料の磁化率異方向性による磁気応答は、数100ミリテスラ以上の磁場を用いた場合、暗視野照明法を用いることで、非常に効果的な磁気応答検出が可能であるが、その変化率は顕著でない場合が

多いため、慎重な磁場中観測を進めている。特に、直流磁場印加の際、磁場オン・オフ時の磁場変化による誘導電流効果が（特に海水中では）生じている可能性を検証すべきである。本報告の目的である「生体系の磁場中観測をいかに成功させるか？」の立場からは、この誘導電流効果を次のメカニズム候補として観察結果を検証していくことには意義がある。

謝辞

本研究報告の内容は、以下の支援により行われました。ここに謝意を表します。

JST さきがけ “Creation of Basic Technology for Improved Bioenergy Production through Functional Analysis and Regulation of Algae and Other Aquatic Microorganisms.”

JST CREST “Advanced core technology for creation and practical utilization of innovative properties and functions based upon optics and photonics (Grant number: JPMJCR16N1).”

参考文献

- 1) Oriented fibrin gels formed by polymerization in strong magnetic fields, J. Torbet, et al., Nature, 289, 91, 1981.
- 2) Biased cell migration of fibroblasts exhibiting contact guidance in oriented collagen gels, R.B. Dickinson, et al., Ann Biomed Eng., 22(4), 342, 1994.
- 3) Strong static magnetic field stimulates bone formation to a definite orientation in vitro and in vivo, H. Kotani, et al., Journal of Bone and Mineral Research, 17 (10), 1814, 2002.
- 4) 魚類のウロコを用いた評価系の開発と骨代謝研究への応用, 鈴木信雄, 他、まぐね, 7, 4 (2012)
- 5) Effects of static magnetic fields on light scattering in red chromatophore of goldfish scale, M. Iwasaka, Journal of Applied Physics 107 (9), 09B314, 2010.
- 6) Light reflection control in biogenic micro-mirror by diamagnetic orientation, M. Iwasaka, et al, Langmuir, 29 (13), 4328, 2013.
- 7) Magnetic control of the light reflection anisotropy in a biogenic guanine microcrystal platelet, M Iwasaka, et al., Langmuir 32 (1), 180, 2016.
- 8) Biaxial alignment control of guanine crystals by diamagnetic orientation, M. Iwasaka, et al., Applied Physics Express 6 (3), 037002, 2013.
- 9) Rapid magnetic wiper featuring biogenic guanine particles: Magnetic non-contact switching of opto-fluidic mirrors featuring biogenic guanine crystals, M. Iwasaka, et al., Applied Physics Letters, 104 (2), 024108, 2014.
- 10) Photonic crystals cause active colour change in chameleons, J. Teyssier, et al., Nature Communications 6, 6368 2015.
- 11) Magneto-optical properties of biogenic photonic crystals in algae, M. Iwasaka, et al., Journal of Applied Physics, 115 17, 17B501, 2014.
- 12) Light intensity modulation by coccoliths of *Emiliania huxleyi* as a micro-photo-regulator, Y. Mizukawa, et al, Scientific reports, 5, 13577, 2015.