

スピングラス — エイジング現象

東京大学 物性研 高山 一¹

序

スピングラス相解明の研究において、近年、エイジング現象が注目されている。エイジング現象とは、転移温度 T_c 以下に急冷された後に系が示す、平衡状態へ向かう緩和過程である。緩和は極めて遅く、また、ある時刻の測定結果はそれまでに系が経過してきた温度や磁場の履歴によって異なる。温度や磁場の変化を様々なコントロールしながら物理量を追い、それから導き出される遅い緩和過程の機構を通してスピングラス相の実体に迫ろうとするのが、エイジング現象によるスピングラス研究である。本報告では、2, 3 の典型的な実験の結果について、それを 3 次元イジング EA 模型においてシミュレートした結果と対比させて解説を行なった。

熱残留磁化の磁場依存性

スピングラスにおけるエイジング現象の最も基本的な過程は熱残留磁化の緩和 (ゼロ磁場冷却磁化の誘起) 過程である。スピングラスを磁場 $h > 0$ ($h = 0$) 中で常磁性相から T_c 以下の温度 T に急冷し ($t = 0$)、時刻 $t = t_w$ まで待った後、磁場を $h = 0$ ($h > 0$) に変え、その後の時刻 $t = \tau + t_w$ における磁化 $m(\tau)$ およびその対数微分 $S(\tau) = \pm dm/d\ln\tau$ を測定する。結果は待ち時間 t_w に依存し、特に $S(\tau)$ はちょうど $\tau \simeq t_w$ あたりでピークを示す (図 1 左図参照)。

Fisher-Huse [1] のスピングラス相に対する液滴描像によれば、急冷後の待ち時間 t_w の間に、系には、その温度の平衡状態に対応した、平均サイズ $R(t_w)$ のドメインが成長する。 h を変化させた後の $\tau \lesssim t_w$ の時間領域では、熱活性化過程で時間スケール τ 内に励起され得る、サイズ $L(\tau)$ のドロップレットが h の変化に応答する。その状況は平衡状態での応答にほぼ等しく、この領域は準平衡領域とよばれる。 $\tau \gtrsim t_w$ ではドメインサイズ $R(t_w)$ を越えるスケールでのスピン配置の変化が起こるが、これは急冷直後の状況と同じ非平衡性の強い状態であり、この時間領域は非平衡領域あるいはエイジング領域とよばれる。 $\tau \simeq t_w$ における $S(\tau)$ のピークは二つの領域間のクロスオーバーに対応する。

最近、Joh ら [2] は、 $S(\tau)$ のピーク位置 t_w^{eff} が測定磁場 h に強く依存するとの実験結果を報告している (図 1)。磁気異方性の小さいハイゼンベルグ型スピングラスで測定されたこの現象は、定性的ではあるが、我々の (3 次元イジング EA 模型の) シミュレーションで再現されている。液滴描像に立てば、 $\ln t_w^{\text{eff}}$ が h^2 に比例して減少するこの結果は、上述のクロスオーバーを決めるサイ

¹ E-mail: takayama@issp.u-tokyo.ac.jp

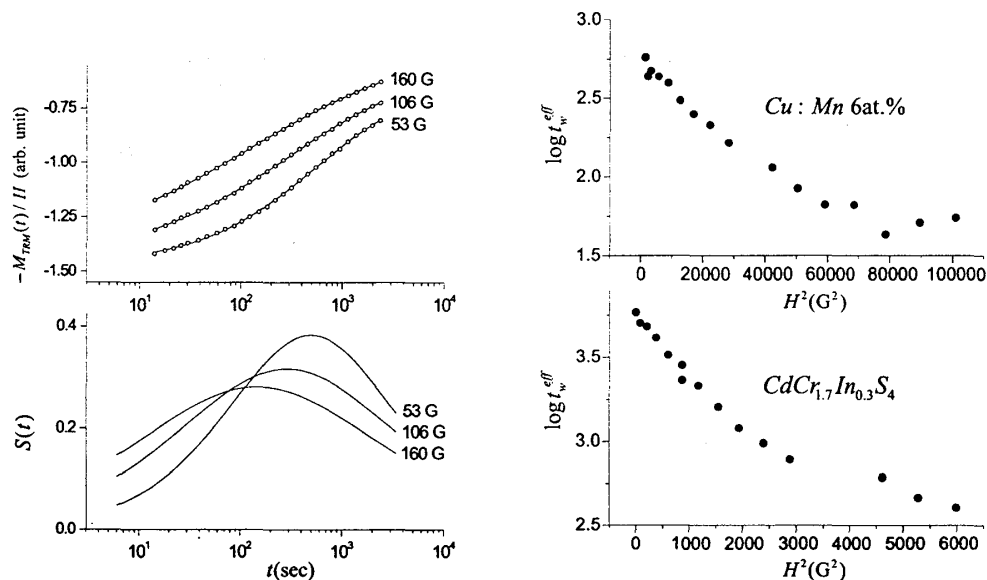


図 1: 左図: 熱残留磁化過程の $m(\tau)$, $S(\tau)$ 。右図: t_w^{eff} の磁場依存性 (文献 [2] より)。

ズがほぼ $R(t_w)$ のドロップレット励起に対する自由エネルギー障壁が、 h の変化によって h^2 に比例するゼーマンエネルギー分だけ減少したと考えられるが、現在、この解釈の妥当性を検討している。

種々の温度変化過程におけるゼロ磁場冷却磁化

エイジング現象が着目される以前は、ゼロ磁場冷却磁化と言え、一般に、系を低温に急冷後直ちに h を印加し、その後一定のレートで温度を上げながら測定した磁化を意味していた。最近、伊藤ら [3] はイジングスピングラス $\text{Fe}_{0.50}\text{Mn}_{0.50}\text{TiO}_3$ について、温度上昇の仕方を様々に変えて実験を行ない、エイジング現象における履歴性を詳しく調べた。図 2 の挿入図にその結果を示す。左図の ZFC が従来のゼロ磁場冷却磁化 (基準曲線とよぶ) で、ほぼ T_c で磁場中冷却磁化曲線 (FC) に合流する。ある温度 T_i (10K, 15K) で温度上昇を 5 時間停止し、その後に元の温度上昇を再開すると、 T_i で一旦基準曲線から外れた磁化がある程度的高温になると基準曲線に戻っていく。図 2 の右図は、温度 T_{i1} で一旦停止中の磁化と、温度 T_{i2} ($< T_{i1}$) での一旦停止を経て温度 T_{i1} で停止中の磁化の時間変化であり、前者を時間軸に沿って適当な時間だけ平行移動すると後者に重なる。この結果は、温度 T_{i1} に到る過程 (履歴) が違っていても、この温度で等しい磁化を示す状態は同一であることを意味している。

時間スケールは異なるが、伊藤らの実験プロトコルに沿ってシミュレーションを行なった結果 [4] が図 2 の主図であり、対応する挿入図のものと定性的によく一致する。シミュレーション結果は次のように説明される。磁場印加後の時刻 τ で励起可能なドロップレットのサイズ $L(\tau)$ は温度変化がある過程においても単調に増大し、但し、高い温度ほど早く増大する。各温度の時間発展

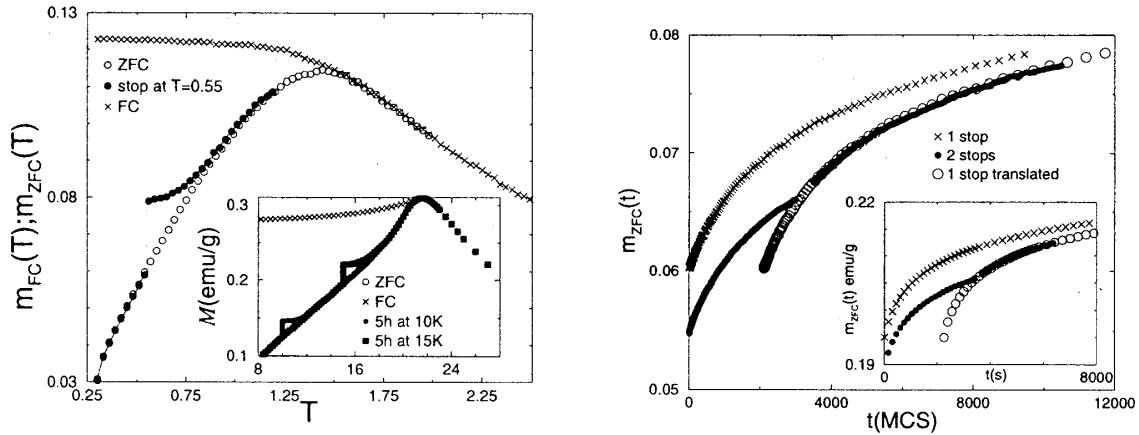


図 2: 種々の温度変化過程におけるゼロ磁場冷却磁化 [4]。

としてドメインの成長則 (指数が温度とともに増大するべき則) を順次適用していくことにより、各温度変化過程における $L(\tau)$ を評価できる。こうして算出した $L(\tau)$ に対してシミュレートされた磁化をプロットすると、温度変化過程が違っていても磁化は $L(\tau)$ で一意に決まることが見出された。伊藤らが結論した同一の状態は $L(\tau)$ で指定されることを意味するが、実際、シミュレーションから導かれたドメインの成長則をそのまま実験の時間スケールまで適用して同じ解析を行なうと、実験結果を定量的に再現できることが検証された。

カオス・メモリー効果

エイジング現象の実験研究では ac 磁化率、特にその虚数部分 $\chi''(\omega; t)$ によるものが多い。図 3 の左図は最近の興味深い結果の一例で、以下の過程を通して測定した $\chi''(\omega; t)$ である。すなわち、温度 T_1 まであるレートで冷却、そこで長い時間エイジングした後冷却を再開、 $T = 5K$ で昇温に転じ冷却と同じレートで温度をあげる。図の実線は温度 T_1 の途中停止がない場合のもので、これを基準曲線とよぶ。まず注目すべきは、温度 T_1 の途中停止において $\chi''(\omega; t)$ は減少するが、冷却を再開後ある程度 T_1 から遠のくと、 $\chi''(\omega; t)$ は基準曲線に戻ってしまう点である。履歴を消失したかに見えるこの現象はカオス効果 (あるいは rejuvenation、若返り) とよばれる。ところが十分低温から系を温め戻してくると、 $\chi''(\omega; t)$ は T_1 あたりで基準曲線から鋭く落ち込む。実は、系は降温過程での途中停止を記憶していたと解釈される結果である (メモリー効果)。

図 3 の右図は対応するシミュレーションの結果である [6]。カオス効果が再現されているとも言えるが、基準曲線への戻り方がかなりゆっくりしている (降温の再開後、実験で見られているような $\chi''(\omega; t)$ の一時的な増大は見られない)。メモリー効果については、昇温過程において T_1 を中心に、かなり浅く広いが、へこみが確かに認められる。

実験ではカオス・メモリー効果はより簡単な温度サイクル過程—温度 T_1 で時間 t_{w1} 待ち、温度を T_2 へ不連続的にシフトして時間 t_{w2} 待ち、温度を T_1 に戻す—でも観測されている。すなわち、温度シフトの幅がある程度大きいと、温度 T_2 における $\chi''(\omega; t)$ は系が初めて温度 T_2 に急冷され

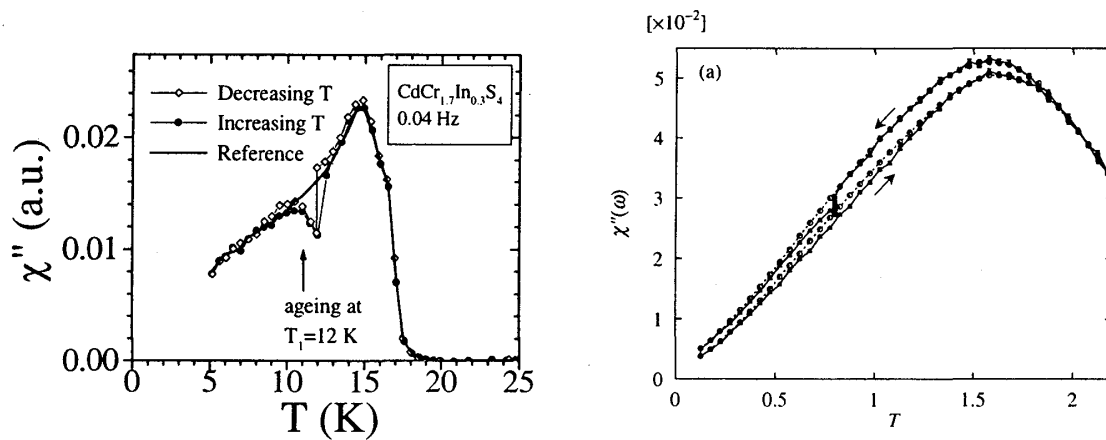


図 3: 左図：カオス・メモリー効果の実験結果 [5]。右図：対応するシミュレーション結果 [6]。

た場合のそれとほぼ等しくなり、温度 T_1 でのエイジングがなかったかのように見えるが、温度 T_1 に戻したときに測定される $\chi''(\omega; t)$ は、 T_1 での最初エイジングで観測されたそれをそのまま延長した曲線にはほぼ載る。シミュレーションでは後半のメモリー効果はよく再現されるが、前半のカオス効果は見られていない [6]。

結び

上述したように、種々のエイジング現象のうち、カオス効果あるいは rejuvenation とよばれている現象だけが 3 次元イジング EA 模型のシミュレーションではほとんど再現できていない。同効果についての実験はこれまでのところハイゼンベルグ型スピングラスについてのみなされている。これをイジングスピングラス $\text{Fe}_{0.50}\text{Mn}_{0.50}\text{TiO}_3$ について調べてみる実験の計画を聞いているが、シミュレーション研究においては、ハイゼンベルグ型スピングラス模型におけるエイジング現象を調べる必要がある。カイラルガラス秩序に絡む現象がでるかどうかの興味をもって、そのシミュレーションを最近開始した。

参考文献

- [1] D.S. Fisher and D.A. Huse, Phys. Rev. B **38** (1988), 373.
- [2] Y. G. Joh, R. Orbach, G. G. Wood, J. Hammann and E. Vincent, Phys. Rev. Lett. **82** (1999) 438, and J. Phys. Soc. Jpn. **69** (2000), Suppl. A. 215.
- [3] A. Ito, A. Tobo, N. Onchi and J. Satooka, J. Phys. Soc. Jpn. **69** (2000), Suppl. A. 223.
- [4] L. W. Bernardi, H. Yoshino, K. Hukushima, H. Takayama, A. Tobo and A. Ito, preprint, cond-mat/0006059.
- [5] K. Jonason, E. Vincent, J. Hammann, J.-P. Bouchaud, and P. Nordblad, Phys. Rev. Lett. **81** (1998), 3243.
- [6] T. Komori, H. Yoshino and H. Takayama, J. Phys. Soc. Jpn. **69** (2000), Suppl. A. 228.