

クラスター成長に於ける Intermittency effect.

山口大教育 古川 浩

急冷された合金等に関する相分離の現象の動的性質は理論・実験・計算機実験の各方面から詳しく調べられ、かなりはっきりしたことが分つて来た。その中で構造関数 $S_k(t)$ 、又は散乱関数 $I_k(t)$ ($\propto S_k(t)$) に対するスケーリングの仮定

$$S_k(t) = R^d(t) \tilde{S}(k R(t)) \quad (1)$$

及び長さのスケール R に対するべき乗則

$$R(t) \propto t^a \quad (2)$$

が一般的に成り立つことが明らかとなった。ここで d は次元、 k は波数、 a は一般に定数である。(1) において次元 d が表われるのは short range order の発達が発達を急速に終了することを示す。(2) は平均の平均量 (ベキ d を除いて) (1) と同様の scaling に従うことからくる。 a は有限の時間 t 内では t に依存し、又 scaling function $\tilde{S}(x)$ も t に依存するが、 $t \rightarrow \infty$ の極限では a はある最大の値 a_1 に収束すると考えられている。ここで最大の極限 a_1 とはその系で考えうる process のうち最大のベキ $a \in \mathbb{R}$ である。relaxational system では $a_1 = 1/2$ (非保存系)、 $a_1 = 1/3$ (保存系)、液体では $a_1 = 1$ となり、いずれも表面張力によってクラスターの成長が促進される。系によって a_1 が異なるのは mobility が系によって異なることによる。上の a_1 に対する値は理論的予想であり、その中で $a_1 = 1/2$ は比較的実験とよく合う。他のベキについてもこれを支持する実験、計算機実験は多くあるが、又これからはずれる実験も多くある。さらに a の変化にしてもより大きい値 a_1 へと変化する場合と、逆により小さい値 a_2 へと変化する場合とが見られる。

より小さい値へと変化する場合は表面張力の効果がないことによる。このように表面張力の効果が禁止されることは Lifshitz や Safran によって理論的に予想されている。これらはクラスターの表面の形状の変化に対して全クラスター表面積の変化がない場合がありうることを示している。例えば2次元系で平均的なクラスターの形状が正六角形であれば、そのうち1つが全体の大ささと少し変化させても境界の長さは変化しない。この場合、クラスターの大きさを変化させる driving force は表面張力ではなく表面の熱運動である。したがって頻繁にクラスターが close-packing の形をとる系 (例えば非常に多くの成分と成分系) では元の $a_1 = 1/2, 1/3, 1$ という exponent は例えばそれぞれ $a_2 = 1/d+1, 1/d+2, 1/d$ 、といった exponent へと置き換えられることになる。しかしある場合は表面張力によって、ある場合は thermal force によって drive されるという中間の性格をもつ系では a が中間の値をとることになるだろう。

さて、クラスターの平均 size R が表面張力によって dt_1 時間内に dR_1 だけ変化、

dt_2 時間内に dR_2 だけ変化するとすれば、クラスターの平均 size R は次の式に従うことになる:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{dR_1 + dR_2}{dt_1 + dt_2} = \frac{F_1(R) + F_2(R)Q}{1+Q}, \quad (3)$$

$$F_1(R) = \frac{dR_1}{dt_1}, \quad F_2(R) = \frac{dR_2}{dt_2}, \quad Q = \frac{dt_2}{dt_1}.$$

ここで $F_1(R) \propto R^{1-\frac{1}{a_1}}$, $F_2(R) \propto R^{1-\frac{1}{a_2}}$, a_1 は表面張力によるもの、 a_2 は thermal force によるものを表す。Q に対して F と同様にスケーリングの仮定

$$Q = Q_0 R^{\frac{1}{a_I} - \frac{1}{a_1}} \quad (4)$$

と仮定する。このとき $\frac{(3)}{(4)} \Rightarrow a_I = a_1$ で

$$\frac{d}{dt} R = \frac{1}{1+Q_0} (F_1(R) + Q_0 F_2(R)) \quad (5)$$

$a_I = a_2$ で

$$\frac{d}{dt} R = (A_1 F_1^{-1}(R) + A_2 F_2^{-1}(R))^{-1} \quad (6)$$

となる。したがって (5) では R の成長速度はより大きい a をもつ R のへと Cross over し、(6) ではより小さい a をもつ R のへと Cross over する。このいずれの場合も理論的に観測されており、方程式 (3) が現実的なものであることがわかる。(3) は一般に $\lim_{t \rightarrow \infty} R \propto t^{a_I}$ を与え、これより $t \rightarrow \infty$ の極限 ~~で~~ a は最大値 a_1 に移行するとは限らないことがわかる。

R の成長速度は中間のベキ $a = a_I$ を持つことは乍ら不自然でしかないことがわかる。したがって、 a_I を計算することは又別の問題である。局所的にも (5) または (6) が成立し、且つ dt_1, dt_2 が十分長い ($\approx O(t)$) と考えれば、近似的に a_I を求めることが出来る、それは

$$a_{I1} = w_1 a_1 + w_2 a_2 \quad (7a)$$

$$a_{I2} = (w_1 a_1^{-1} + w_2 a_2^{-1})^{-1} \quad (7b)$$

を得る。ここで a_{I1} は高温で、 a_{I2} は低温で成り立つと考えることが出来る。 w_1 は表面張力が有効であるクラスターの配置が実現する確率、 $w_2 = 1 - w_1$ 。近似的に高温では

$$w_1 = \text{Min.} [3p^{-1}, 1] \quad (8)$$

これは球を close-pack させた時の nearest neighbor にある球の数。 p は relaxation system では species の数, 2成分液体では少数成分の volume fraction の逆数である。高温では(7)(8)の計算機実験や1部の液体の実験をよく説明する。低温ではこれらのほか a_2 及び w_1 の温度依存性を考慮しなければならぬ。 a_2, w_1 の高温における値はすべて界面の動きやすさと関係することと考慮される

$$a_2(T) = a_2 f(T), \quad w_2(T) = w_2 f(T)$$

$$f(T_c) = 1$$

と置けるだろう。

結論 クラスターの成長において単一のメカニズムが支配する場合と、複数のメカニズムによって成長が支配される場合とがある。後者は場合によってはクラスター成長が lock されることがある。より小さい成長速度へのクロスオーバー、より大きい成長速度へのクロスオーバー、と2種類類のクロスオーバーが存在することから、その中間的なるものも現象に存在するべきである。

参考文献

- ・ クラスターの成長の locking について
I.M. Lifshitz, Sov. Phys. JETP 15, 939 (1962)
S.A. Safran, Phys. Rev. Lett. 46, 1581 (1981)
- ・ Intermittency について
H. Furukawa, Phys. Lett. 98A, 361 (1983)
Phys. Rev. A (in press)
- ・ Cross over, locking-in の実験について。
高温で「小さい a_2 から大きい成長速度への Cross over について。例として液体」
K.C. Wong and C.M. Knobler, Phys. Rev. A 24, 3205 (1981) 及びその引用文献。合金では S. Kafano and M. Mizumi, Preprint sur 58年度日本物理学会予稿集(金属)
低温で「大きい成長速度から小さい成長速度への Cross over について。例として」
S. Komura, 他 Physica 120B, 397 (1983). M. Furusaka, 他 Physica 120B, 383 (1983).
- ・ 中間の a_2 への Cross over する計算機実験
P.S. Sahni et al, Phys. Rev. Lett 50, 263 (1983) and Phys. Rev. B 28 2705 (1983)
A. Saiz and K. Binder, Phys. Rev. Lett. 51, 679 (1983) and Preprint.