

脂質膜上でのナノドメインの静的および動的構造

佐久間由香・今井正幸
お茶の水女子大学 理学専攻

生体膜では膜蛋白・糖脂質・ペプチド等の機能性分子が膜内に分散しており、これらの機能性分子またはその分子集合体が膜内を拡散・反応し、その電子伝達によって機能が発現する事から、ナノメートルサイズの物質の膜面内での拡散を支配する要因を明らかにする事は非常に重要である。理論的には Saffman と Delbrück が膜と周りを取り囲む水相との流体力学的相互作用を考慮したモデルから、半径 r をもつナノメートルスケールの物体の拡散係数 D を、水相の粘度 η_w 、膜の粘度 η_m 、膜厚 h を用いて以下の様に表した。

$$D(r) = \frac{k_B T}{4\pi\eta_m h} \left[\ln\left(\frac{\eta_m h}{\eta_w r}\right) - 0.5772 \right] \quad (1)$$

この Saffman-Delbrück 則の検証は今まで様々な形で行われてきたが、直接ナノメートルサイズの物体を観察する方法が限られている事、および非常に弱いサイズ依存性の為、その妥当性については未だ議論のあるところである。我々はこの問題に対し、相分離によりナノメートルスケールのドメインを形成させ、膜面内でのドメインの拡散ダイナミクスを測定することにより膜内でのナノメートルスケールドメインの拡散係数を求めた。

実験は重水素化した DPPC、軽水素化 DOPC およびコレステロールの3成分系ベシクルを用い、超音波処理にすることによりナノメートルスケールの SUV を作製し、ドメインサイズをナノメートルスケールに制限した。3成分膜の平均の散乱長密度を溶媒と一致させたコントラストマッチング条件でこの SUV の中性子小角散乱を測定すると、高温の一相領域では、全く散乱は観察されず、膜の構成分子が均一に分散している事を示している。温度を下げると二相領域にすると、 $q=0.02\text{\AA}^{-1}$ 付近にピークを持つ特徴的な散乱曲線を示した。この散乱曲線を多ドメインモデルを用いてモンテカルロシミュレーションから求めた散乱曲線によりフィッティングしドメインサイズを評価すると 7~10 nm の値が得られた。このドメインのダイナミクスを中性子スピンエコー法で測定した。得られた中間散乱関数を2モード解析によりドメインの拡散係数を求めると、 $D_d = (2.3 \pm 0.9) \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ が得られた。この値は絶対値として(1)式から求まる値 $D = 2.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ とよく一致した。更に NMR 測定から求まる一分子 ($r=0.35\text{nm}$) の拡散係数 $D_{mol}^{DPPC} \approx 3.9 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ と併せることにより、ナノスケールでの Saffman-Delbrück 則の成立を実験的に確認する事が出来た。