

脂質二重膜間の静電相互作用と相挙動

東京都立大学大学院 理学研究科 白鳥久志、好村滋行、加藤直

細胞膜は、主にリン脂質の二重膜で形成されており、生体機能の中で重要な役割を果たしている。リン脂質と水の二成分系は、リン脂質の濃度や温度に応じて様々な液晶構造をとることが知られている。その中の典型的なラメラ構造として、 L_α 相や L_β 相などが存在する。高温相に対応する L_α 相ではリン脂質の炭化水素鎖が乱れているのに対し、低温相の L_β 相では炭化水素鎖の配向が揃っている。本研究では、文献 [1] で導入されたリン脂質と水の二成分系に対するモデルを拡張して、膜間の静電相互作用がラメラ構造に与える影響を解析した [2]。

文献 [1] では、系全体の自由エネルギーとして膜の内部自由度と外部自由度からの寄与を考慮している。まず、膜の内部自由度を表すために、膜の厚さから秩序変数を $\psi \equiv (\delta - \delta_0)/\delta_0$ のように定義した。ここで δ_0 は過剰水と共存している L_α 相の膜厚で、 $\delta > \delta_0$ である。この秩序変数を用いると、 L_α 相と L_β 相の間は一次相転移なので、ランダウ自由エネルギーは次式になる。

$$F_L(\psi, T) = \frac{1}{2}a_2(T)\psi^2 + \frac{1}{3}a_3\psi^3 + \frac{1}{4}a_4\psi^4 \quad (1)$$

一方、膜の外部自由度として膜間の距離に依存する相互作用を考える。親水頭部が電氣的に中性の場合、長距離的なファン・デル・ワールス引力と、短距離的な水和斥力が支配的な相互作用であり、文献 [1] ではこの二つが考慮されている。

脂質二重膜には膜表面が帯電しているものが多い。そこで本研究では、上記のモデルに静電相互作用を取り入れた。このとき、系が電解質リザーバーとつながっている場合を考えた。膜間の相互作用エネルギーは、ポアッソン・ボルツマン方程式から求まる。表面電荷密度が大きく、さらに膜間の距離がデバイ・ヒュッケルの遮蔽長 $\Lambda_D = (\epsilon_0\epsilon_w k_B T / 2n_0 e^2)^{1/2}$ より長いとき、静電相互作用エネルギーは次式のように近似できる。

$$V_e = (32\epsilon_0\epsilon_w (k_B T)^2 / e^2 \Lambda_D) \exp(-d/\Lambda_D) \quad (2)$$

ここで n_0 はリザーバーの電解質濃度、 ϵ_0 と ϵ_w はそれぞれ真空と水の誘電率である。

上記すべてのエネルギーの和を最小化して得られたのが、図 1 の相図である。ここで $1 - \phi$ は、水の体積分率である。電解質濃度が低くなると、ラメラ相の一相領域が脂質の低濃度側に広がることが分かる。これは、電解質による電場の遮蔽が減少するためと考えられる。遮蔽効果の減少で静電斥力が強くなると、膜間の距離が大きくなることのできる。そのためラメラ構造は、より多くの水を含むことができるようになる。臨界点の位置にはほとんど変化が無く、 L_α 相と L_β 相の二相共存領域が延びる。

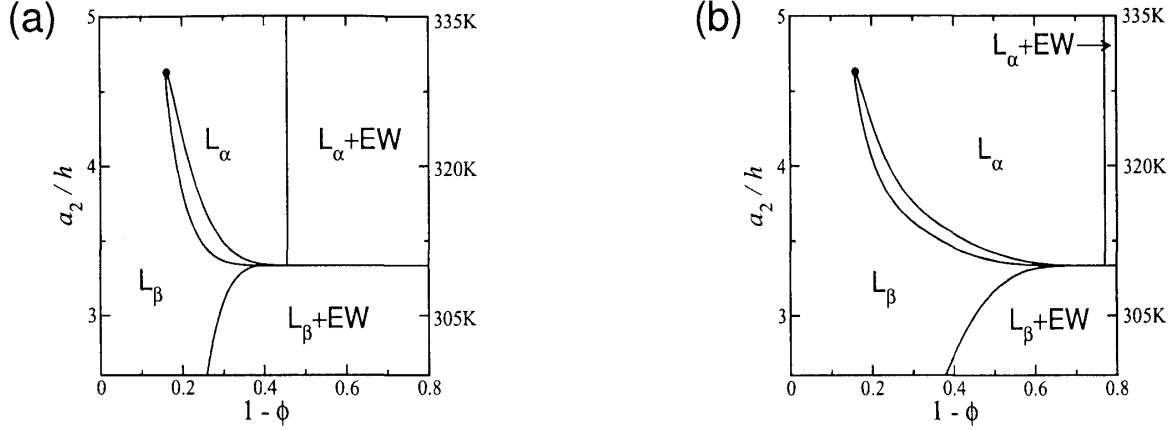


図 1: (a) $n_0 = 1.0$ [M] での相図。 (b) $n_0 = 0.1$ [M] での相図。

図 2(a) は過剰水と共存する L_α 相の膜厚、膜間距離、遮蔽長の電解質濃度依存性を表している。膜間距離が遮蔽長より長いという仮定が満たされていることが確かめられる。図 2(b) は、 $n_0 = 0.1$ [M] でのくり返し距離の濃度依存性である。これらの結果は、実験結果と定性的に合うものとなった。

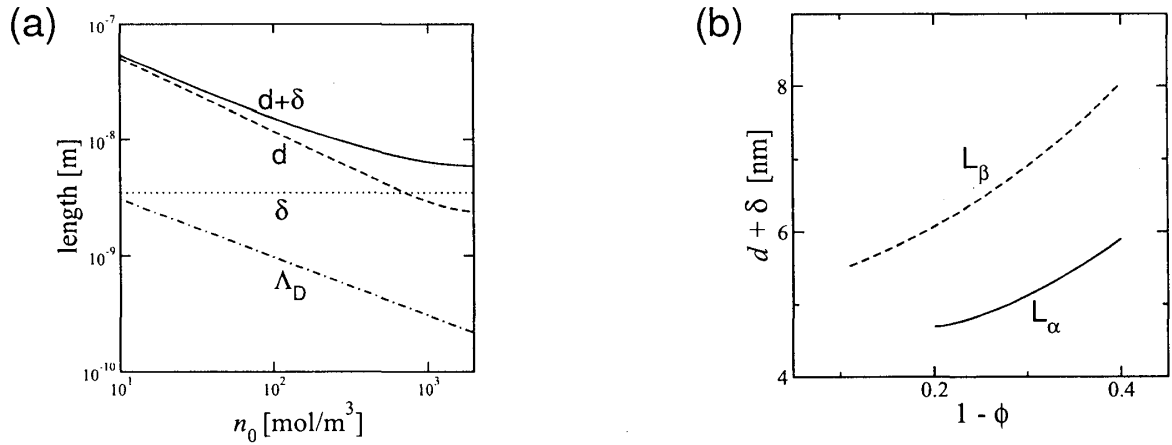


図 2: (a) 膜厚 (δ)、膜間距離 (d)、遮蔽長 (Λ_D) の電解質濃度依存性。 (b) $n_0 = 0.1$ [M] でのくり返し距離の濃度依存性。

参考文献

- [1] R. E. Goldstein and S. Leibler, Phys. Rev. A **40** (1989), 1025.
- [2] S. Komura, H. Shirotori, and T. Kato, J. Chem. Phys. **119** (2003), 1157.