

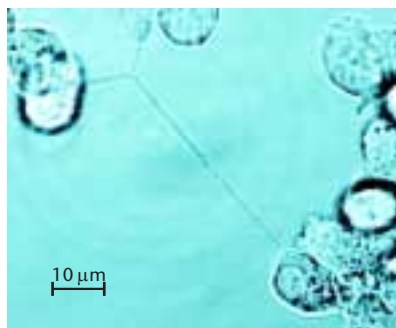
Membrán nanocsövek

A felületnövelés felsőfoka

Az élő sejtek felépítésüknél fogva két alapvető csoportra oszthatók: a sejtmagot nem tartalmazókra (prokariótákra vagy más néven baktériumokra), valamint a sejttaggal rendelkezőkre (eukariótákra, ahová többek között az összes többsejtű élőlény sejtjei is tartoznak), 1. ábra. Ezen utóbbi csoport tagjainak további jellegzetessége, hogy bennük különféle sejtszervecskék találhatók, amelyek különböző biológiai feladatok ellátására szakosodtak. A sejtszervecskék általában nagy mennyiségű membránt (a sejtthártyához hasonló felépítésű, néhány nanométer vastagságú lipid kettősréteget) tartalmaznak, hiszen a biokémiai feladatokat végző fehérjék jelentős része membránhoz kötődve működik. Ezek a membránstruktúrák meglehetősen nagy dinamikus alakváltozásokra képesek (a sejt életciklusa során vagy külső hatások következtében nemcsak átrendeződhetnek, de akár időnként el is tűnhetnek, majd újra felépülhetnek).

Mivel a sejtszervecskékben található membránok összfelülete több nagyságrenddel is meghaladhatja a sejt felszínét, valamiféle kompaktifikációra szorulnak. Erre az egyik kézenfekvő lehetőség az, hogy a membránok lapos korong alakú képződmények szorosan pakolt halmazába rendeződnek (mint pl. az energiaátalakítást végző mitokondriumok belső membránja, vagy a fehérjék szintéziséért felelős durva endoplazmatikus retikulum, vagy éppen a fehérjék osztályozását végző Golgi-apparátus). Egy másik lehetőség a kompaktifikációra a mindössze néhány száz nanométer vastagságú nanocsövek kialakítása. Ilyen nanocsövek hálózatából áll a sima endoplazmatikus retikulum. Nanocsövek találhatók a Golgi-

apparátus bemeneti és kimeneti oldalán is, de még a sejtthártyán is különféle csőszerű membránkitüremkedések (csillók, állabak stb.) fordulhatnak elő. Csak az utóbbi években derült fény arra, hogy bizonyos típusú sejtek (pl. immunsejtek, agysejtek, vesesejtek) képesek egymás közt nanocsöveket létrehozni, majd ezeken keresztül kommunikálni (különböző anyagok vagy jelek továbbításával), 2. ábra. Mivel a nanocsövek gyorsabban létrehozhatók, távolabbra elérhetnek és könnyebben szállíthatók, mint a ko-



2. ábra. Immunsejtek között feszülő membrán nanocsövek. Három cső a találkozásuk pontjában 120°-os szöveget zár be egymással.

rong alakú struktúrák, feltehetően a dinamikusabban változó szerkezetű vagy a transzportfolyamatokban résztvevő membránstruktúrák esetén lehetnek hasznosak a sejtek számára.

A membrán nanocsövek kialakulása nagyon egyszerűen leírható fizikai folyamat. Ezt tekintjük át részletesen a cikk hátralévő részében. Ehhez elég annyit tudnunk a membránokról, hogy jól közelíthetők kétdimenziós összenyomhatatlan (nyújthatatlan) folyadékként.

Kétdimenziósként azért, mert mindössze két vékony lipidrétegből állnak (amelyben a lipidmolekulák hidrofób farokrésze a membrán belseje felé, a hidrophil fejrésze pedig kifelé mutat), 3. ábra, és

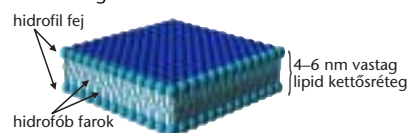


1. ábra. Az eukarióta sejt sematikus képe

ezek együttes (tipikusan 4–6 nm) vastagsága messze elmarad a membránfelületek egyéb jellemző méretétől (pl. a másik két irányú kiterjedésétől vagy a görbületi sugarától). Összenyomhatatlannak azért tekinthetjük őket, mert minden egyes lipidmolekulára egy jól meghatározott méretű felületegység jut (1–2%-nál nagyobb felületváltozást a membrán nem bír ki). Folyadékként pedig azért kezelhetjük, mert a membrán síkjában (a sejtek működését lehetővé tevő hőmérsékleten) a lipidmolekulák szabadon elmozdulhatnak. A viszkozitásuk egyébként körülbelül két nagyságrenddel meghaladja a vizét.

Membrán nanocsövek általában erősen lokalizált húzóerők hatására jönnek létre. Ez történhet úgy, hogy motorfehérjék (olyan molekulák, amelyek képesek a sejt váz szálai mentén haladni) egy kis felületen megragadják a membránt, és elkezdik a membrán síkjára merőlegesen húzni, vagy pedig úgy, hogy polimerizálódó szálak eléri a membránt, és azt elkezdik nyomni. Már

3. ábra. A biológiai membránokat alkotó lipid kettősrétegek szerkezete.

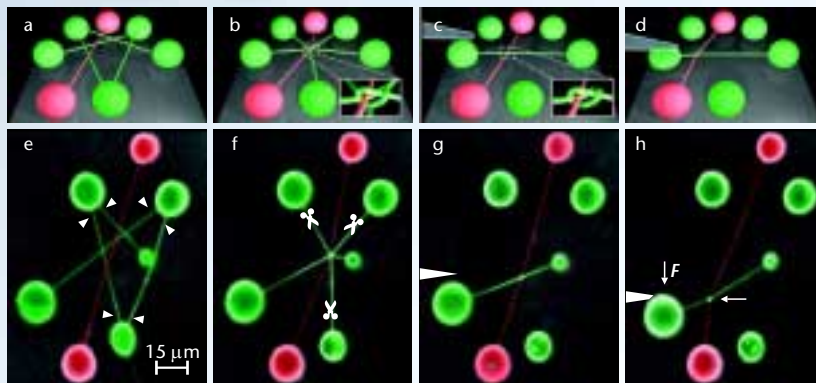


csak az a kérdés, hogy a lipidmembránoknak milyen fizikai tulajdonsága teszi lehetővé az ilyen hosszú cső alakú kitüremkedések kialakulását, hiszen a hétköznapi tapasztalatunk azt sugallja, hogy ha egy lapot vagy lepedőt egy pontban megragadva elkezdünk deformálni, akkor valami kúpszerű képződményt kapunk. A válasz abban rejlik, hogy a membránok deformációját alapvetően a következő két rugalmas paraméter határozza meg: a σ felületi feszültség és a κ hajlítási merevség.

Ha ugyanis egy közelítőleg sík alakú membrándarabot egy pontjában meghúzza deformálunk, akkor ehhez először is többletfelületre van szükségünk. Mivel a membrán nyújthatatlan, ezt a többletfelületet vagy a membrán (termikusan gerjesztett) gyűrődéseinek kisimítása árán szerezhetjük be, vagy a membrán egy távoli részétől vonhatjuk el (pl. letapadt felületdarabok felszakításával), vagy a membránnal esetleg kapcsolatban lévő lipidtartályból nyerhetjük ki. A lényeg, hogy ehhez energiát kell befektetnünk, amelynek felületegységre jutó nagyságát jellemzi a σ ($\sim 10^{-6}$ – 10^{-3} N/m) felületi feszültség. Bár ez a paraméter szoros analógiában áll a közismert határfelületi (pl. víz–levegő) feszültséggel, a fentiek alapján jól látható, hogy fizikai eredete egészen más.

Mivel a membrán egy kétdimenziós folyadék, az érintősíkjával párhuzamos nyírással szemben nem tanúsít rugalmas ellenállást, csak a síkra merőleges hajlítással szemben. Ez utóbbit jellemzi a κ ($\sim 10^{-20}$ – 10^{-19} J) hajlítási merevség, amely felületegységenként $(\kappa/2)C^2$ energiával bünteti a membrán C görbületű meghajlását.

Hogy egy szemléletes képet kapjunk a nanocsövek keletkezéséről, először csak a felületi feszültségnek a felületet csökkentő hatását vegyük figyelembe. A minimális felülettel jellemzett konfigurációhoz akkor jutnánk el, amikor a membrán teljesen visszahúzódna az eredeti síkjába, és a húzási ponthoz már csak egy infinitezimálisan keskeny (zérus



4. ábra. Csomó kötése membrán nanocsőre oly módon, hogy (a és e) a megfelelő három vezikulumból (membránzsákból) kifutó csöveket a tövüknél fogva párosával összeolvasztjuk, majd miután az így keletkező Y-elágazások középre befutnak, (b és f) a maradék három csövet is elvágjuk (felső képsor: illusztráció, alsó képsor: kísérlet).

felületet hordozó) szállal kapcsolódna. Ahogy azonban a membrán kezd ráhúzódn erre a képzeletbeli szállra (bármilyen is legyen a kiindulási konfiguráció), a görbülete egyre csak nő. Ekkor válik meghatározó szerepűvé a hajlítási merevség, amely egy ponton megállítja az összehúzódást. Az eredmény pedig egy egyenes keresztmetszetű cső (a végeitől eltekintve), amely a membrán síkja és a húzási pont között feszül.

Ennek a csőnek egyszerűen kiszámolhatjuk a sugarát. Annyit kell csak tennünk, hogy felírjuk egy R sugarú (vagyis $C = 1/R$ görbületű) és L hosszúságú henger rugalmas energiáját:

$$E(R, L) = [(\kappa/2)(1/R)^2 + \sigma] 2\pi R L,$$

majd minimalizáljuk R szerint. Ebből

$$R_0 = \sqrt{\kappa/(2\sigma)}$$

adódik a cső sugarára, amely tipikus paraméterértékek esetén (pl. $\sigma = 5 \cdot 10^{-5}$ N/m és $\kappa = 4 \cdot 10^{-20}$ J) valóban mindössze néhány száz nanométer nagyságú. Ha most az R_0 -ra kapott formulát visszahelyettesítjük a henger rugalmas energiájába, akkor az

$$E(R_0, L) = 2\pi \sqrt{2\sigma\kappa} L$$

kifejezésből kiolvashatjuk, hogy a nanocsövek hosszegységenként

$$f_0 = 2\pi \sqrt{2\sigma\kappa}$$

energiát tárolnak, vagyis éppen ekkora húzóerő szükséges a létrehozá-

sukhoz. Tipikus paraméterértékekre ez tíz pikonewton körüli erőt jelent, amelynek azért nagy a biológiai jelentősége, mert már akár egyetlen polimerizálódó szál vagy néhány molekuláris motorfehérje is képes kifejteni. Az, hogy a nanocsövek mentén egy ilyen állandó nagyságú feszítőerő lép fel, jól látszik három cső találkozásánál, ahol is az erők egyensúlya miatt a csövek úgy állnak be, hogy egymással páronként 120° -os szöget zárjanak be.

Végezetül érdemes megemlíteni, hogy membrán nanocsöveket és egész nanocsőhálózatokat mesterségesen (pl. optikai csipesszel vagy mikropipettával) is elő lehet állítani. Ezek segítségével tanulmányozhatjuk a membránok dinamikáját és rugalmas tulajdonságait (pl. különféle lipidek és membránfehérjék jelenlétében), amelyek nagyon fontosak a sejtekben található különféle sejt-szervecské kialakulásának és átrendeződésének megértése szempontjából. Ugyanakkor a membrán nanocsövek alkalmasak lehetnek új nanotechnológiai eljárások kidolgozására is, például nagyon kis mennyiségű folyadékok jól kontrollált módon történő mozgatására, keverésére. A nanocsövek egyébként meglepően stabil struktúrák, még azt is könnyedén kibírják, ha csomót kötünk rájuk (4. ábra).

Derényi Imre

ELTE, Biológiai Fizika Tanszék