

人体磁场探测及在生物医学中的应用

谢 廷 栋

(南开大学物理系)

早在 1875 年 Caton 就在英国医学杂志上发表了从动物脑记录的电活动。此后的一百多年,生物电的研究迅速发展,至今已相当深入,并早已成为临床诊断手段,如心电图(ECG),脑电图(EEG)等。相比之下,人体磁性活动的研究却远远落后。尽管人们熟知电与磁的孪生关系,而且预言生物磁场是客观存在的,但是直到 1963 年才由美国锡拉丘兹大学的 G. Baule 和 R. McFee 第一次从人体记录出心磁活动^[1]。生物磁信号首次记录比生物电信号首次记录落后了大约 90 年。其所以落后,原因是多方面的,但主要的是探测仪器的分辨率达不到要求、生物磁信号极其微弱并深深地淹没在环境磁噪声之中。随着科学技术的不断发展,特别是二十世纪六十年代末期以来,高屏蔽效率的磁屏蔽室的建成和超导量子干涉式磁强计(SQUID)的问世与应用,才使得生物磁场的研究得到较快的发展。迄今探测到的人体磁场有:心磁场、脑磁场、肺磁场、神经磁场、肝磁场、视网膜磁场、肌磁场等。本文仅就人体磁场探测及在生物医学中的应用进展情况做简要地介绍。

人体磁场的来源及强度

人体磁场的产生与存在主要基于下列几个方面:

1. 由天然生物电流产生的磁场 人体中的生理活动,常常伴随着离子电流,由毕奥—萨伐尔定律可知,这电流便产生了磁场。如心磁场、脑磁场等均属于这一类。

2. 由强磁性物质产生的剩余磁场 强磁性物质粉末侵入人体某些器官,在外界磁场作用下被磁化,从而产生剩余磁场。如肺磁场、腹部磁场等均属于这一类。

人体磁场的强度都是比较微弱的。例如:肺磁场强度为 10^{-7} — 10^{-4} GS(高斯)数量级,心磁场强度为 10^{-6} GS 数量级,“自发”脑磁场强度为 10^{-8} GS 数量级,“诱发”脑磁场和视网膜磁场强度为 10^{-9} GS 数量级等。然而,周围环境磁噪声强度比这些要大得多。例如:地磁场强度为 0.5 GS 左右,地磁起伏噪声强度为 10^{-5} — 10^{-3} GS 数量级,城市交流磁噪声强度为 10^{-4} — 10^{-2} GS 数量级,若距离大型钢铁件(如机床、电磁设备)或活动车辆(如无轨电车、汽车、火车)较近,则磁噪声强度就更大。

探测技术及设备

由上可见,人体磁场如此微弱,而环境磁噪声又是如此强大,于是如何从强大噪声背景中把微弱人体磁信号提取出来,便成为人们长期力求解决的问题。目前,常采用的检测技术和仪器有:

1. 铁磁屏蔽 直流磁场和低频交流磁场的屏蔽是相当困难的,一般来说需采用高磁导率磁性材料制成屏蔽体,这种方法称为“铁磁屏蔽”。下面是屏蔽效率的近似计算公式^[2]:

对于单层球形屏蔽体,

$$S = \frac{1.3\mu t}{d} \quad (1)$$

对于双层球形屏蔽体,

$$S = \left(\frac{1.3\mu t}{d_{av}} \right)^2 \left(1 - \frac{d_i^3}{d_o^3} \right) \quad (2)$$

上二式中, μ 为磁导率, t 为屏蔽体厚度, d 为屏蔽体直径, d_{av} 、 d_i 、 d_o 分别为双层时的平均直径、内径、外径。由上二式可见,铁磁性材料的磁导率越高,屏蔽体越厚、尺寸越小,层数越多,屏蔽效果就越好。

对于方形屏蔽体, 上二式中的系数 1.3 换成 0.7 后仍然成立。

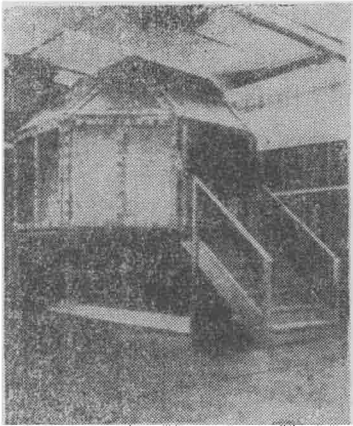


图 1 M. I. T. 磁屏蔽室

图 1 是美国麻省理工学院的一个高效率 26 面体磁屏蔽室^[3]。此磁屏蔽室的外径为 3.8 米, 内径为 2.3 米, 三层坡莫合金主要用于屏蔽直流磁场和低频交流磁场, 两层铝主要用于屏蔽交流磁场。该屏蔽室中心磁感应强度 $|B| \leq 10^{-8}$ GS (均方根值, 包括直流和交流)。这对精密测量的确是一个理想的场所。

这一类屏蔽成本昂贵, 建造难度大, 推广甚为困难。

2. 空间鉴别技术 这里指一次微商梯度计或二次微商梯度计, 其线圈构形如图 2 所示。图 2(a) 是一次微商梯度计线圈构形示意图, 图 2(b) 是二次微商梯度计线圈构形示意图, 前者可测 $\frac{\partial B_z}{\partial x}$, 后者可测 $\frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2}$ 。用空间鉴别技术检测人体磁场依据下述原理: 当磁噪声源距离探测位置较远时 (称远场源), 噪声在这空间分布比较均匀, 梯度计线圈对它不灵敏, 仪器无输出; 被测信号距离探测线圈很近 (近场源), 它在这空间分布不均匀 (有梯度), 梯度计线圈对信号很灵敏, 仪器有输出。这样一来, 便把微弱人体磁场从背景噪声中提取出来。

这种方法简单易行, 价格低廉, 小型轻便, 很容易推广应用。在效果上虽不能与铁磁屏蔽相比拟, 但对多数人体磁场探测已能满足要求。不久前, 我们在人体肺磁场的探测中采用了这

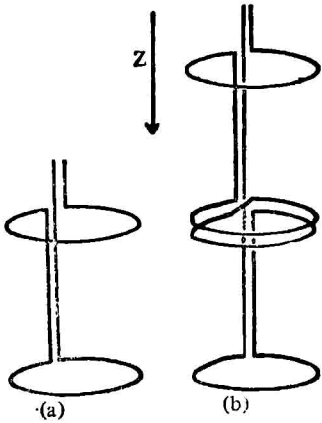


图 2 梯度计线圈构形

一技术, 收到了较好的效果。

3. 涡电流式磁屏蔽与空间鉴别技术相结合

用高电导率金属材料制成屏蔽体, 使外界交流磁场在厚壁金属材料内产生涡电流, 而该电流在屏蔽体内产生的磁场刚好与外界交流磁场相抵消, 这种方法叫做“涡电流式磁屏蔽”。其屏蔽效果可近似用下式表示^[4]:

$$H(\omega) = \frac{H_{ext}(\omega)}{(1 + j\omega\tau)} \quad (3)$$

其中, $\tau = \frac{\mu_0 \sigma w h^2}{2(w + h)}$, 由(3)式可见, 交流磁干扰场的频率越高屏蔽效果越好, 但对低频成分也有一定屏蔽作用。如加拿大达尔豪谢大学的 G. Storink 等人建造的铝屏蔽室 ($l = 3.66\text{m}$, $w = 2.44\text{m}$, $h = 2.44\text{m}$, $t = 1.88\text{cm}$, $\sigma = 0.36 \times 10^8/\Omega\text{-m}$), $\tau = 0.52\text{S}$, 对于 60Hz 工频仍有 46db 的衰减。

这类屏蔽室对直流磁场无屏蔽作用, 但与空间鉴别技术相结合仍能取得较好的效果, 而且从造价上来看比铁磁屏蔽要便宜得多。

上述诸措施主要是针对磁探头的, 在排除外界噪声与干扰上是很有效的。至于电子线路部分, 随着电子技术的不断发展, 亦有不断革新。如低噪声参量放大, 锁定式放大、信号平均及相关技术、微信息处理技术等均在一些场合下被采用。限于篇幅, 不再一一介绍。

4. 磁通门式磁强计 图 3 是一个典型的二次谐波法磁通门式磁强计简化原理方框图。目

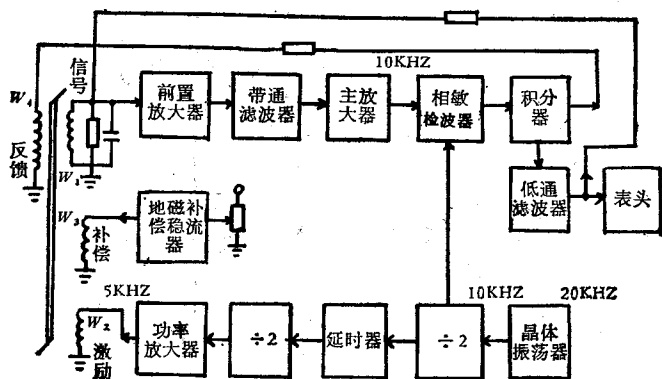


图3 磁通门式磁强计简化方框图

前，影响磁通门式磁强计分辨率的主要因素是探头部分所产生的噪声，它们是热噪声和 Barkhausen 噪声。

热噪声可用下式表示：

$$E = \sqrt{4RKT\Delta f} \quad (4)$$

其中， E 为热噪声电势均方根值， R 为线圈电阻， K 为波尔兹曼常数， T 为绝对温度， Δf 为磁调制器通频带。通常，由热噪声导致的磁噪声约为 $\sim 10^{-10} \text{GS}/\sqrt{\text{Hz}}$ 数量级。

Barkhausen 噪声的影响所导致的信噪比可用下式表示^[5]：

$$\begin{aligned} \left(\frac{V}{\Delta V}\right)^2 &= N_B \cdot \frac{\mu \cdot H_0^2}{B_s^2/\mu} \cdot \frac{t_m}{\tau} \\ &= \frac{H_0^2}{H_s^2} \cdot \frac{t_m}{\tau} \cdot N_B \end{aligned} \quad (5)$$

其中， N_B 为 Barkhausen 体密度， τ 为随机跳跃数的时间间隔， t_m 为整合时间， μ 为磁芯磁导率， H_0 为外磁场强度， B_s 为磁性材料磁感应强度。通常，Barkhausen 噪声所导致的磁噪声大约比热噪声所导致的磁噪声大 1—2 个数量级。降低它的办法是仔细选择磁芯材料。

目前，磁通门式磁强计噪声已降到 $3 \times 10^{-7} \text{GS}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[6]，若在磁芯材料，工艺处理和电子线路上进一步改进，尚有一定潜力可挖。

磁通门式磁强计的突出优点是简单、便宜、使用方便、容易推广应用，缺点是分辨率较低。目前主要用来进行肺磁场探测。

5. 超导量子干涉式磁强计 图4是一个实

用的具有空间鉴别能力的 SQUID 系统方框图^[7]。由于 SQUID 灵敏元件浸入极低温度的、装有液氮的杜瓦瓶中，大大降低了系统的噪声。

目前，SQUID 系统噪声已降低到 $6 \times 10^{-11} \text{GS}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[8]。

SQUID 系统的突出优点是分辨率极高，几乎所有微弱的人体磁场都能用它测量，这对精密的研究工作无疑是极为理想的。SQUID 系统的主要缺点是需要消耗液氮，这就需要有庞大的低温设备。因此，极大地限制了它的推广应用。

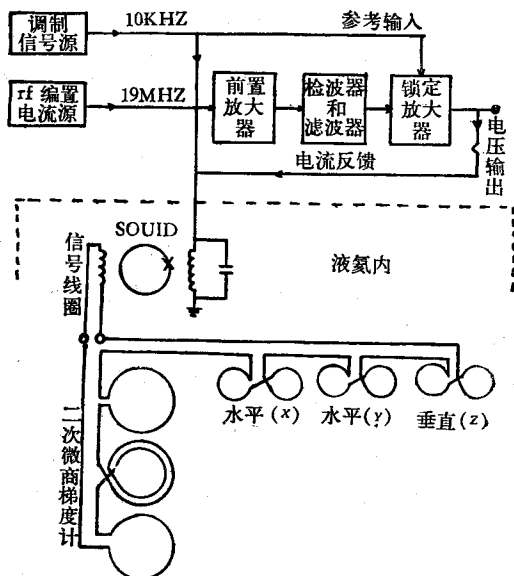


图4 SQUID 系统方框图

人体磁场探测结果及应用

1. 心磁场 它是最早探测到的人体磁场，迄今也是最活跃的研究课题。图5是在一个受试者胸部同时记录的心磁图（MCG）和心电图。

Lepeschkin 通过大量研究发现，对于许多非正常的 MCG 和 ECG，在 MCG 中得到的信息在 ECG 中却找不到，可见 MCG 比 ECG 能提供更多的信息。I. R. Eghrari 等测量了 MCG 与 ECG 的相位与幅值关系，记录了所谓“心磁图—心电图”^[9]。

另外，MCG 能直接反映心脏内部电流源

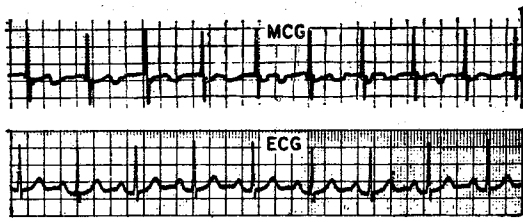


图5 同时记录的 MCG 和 ECG

的活动状况而不必与皮肤接触。当心脏受损伤时(如血供应受到阻碍),会产生所谓“损伤电流”(直流)这可以导致心绞痛和心肌梗塞的发作。由于皮肤与电极之间存在接触电位差,ECG 不能反映上述情况,而 MCG 却能很好地反映出来。

在心磁图上获得的一个极有意义的结果是胎儿的心磁图。由于 SQUID 梯度计的空间鉴别能力强,可以把胎儿的心磁信号与母体的强大信号分开,而胎儿心电信号则常常被母体的强大信号遮盖。特别是 30 周龄左右的胎儿,由于产生一层绝缘的薄膜,使得心电图完全失效,而心磁图则不受这一影响。图 6 给出 29 周龄胎儿心磁图和心电图之比较,其中 F 代表胎儿信号, M 代表母体信号。由图可见,29 周龄胎儿心磁信号非常清楚,而心电信号却很小,且被强大的母体信号遮盖。

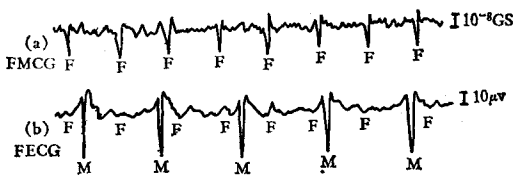


图6 29周龄胎儿 FMCG 与 FECCG 之比较

2. 脑磁场 它是人体磁场中比较微弱的。1968 年美国麻省理工学院的 D. Cohen 首先测得 α 的节律活动的自发脑磁场^[10]。由于当时条件所限,不得不采用信号平均技术,获得的结果也比较粗糙。1971 年他又用 SQUID 系统对脑磁场进行了精确测量^[11], 获得了很好的效果。图 7 是在磁屏蔽室内用 SQUID 系统测脑磁场的示意图。图 8 A 是在一个受试者身上同时记录的脑磁图(MEG)和脑电图,图 8 B 是癫痫病

人过度换气产生的大信号, MEG 和 EEG 也是同时记录的,其中 EEG_a 是在右颞部, EEG_b 是在右耳上部, EEG_c 是在枕外隆起尖部。研究表明, MEG 和 MEG 之间存在着密切的但又不同的关联,睡眠和癫痫的 MEG 常常表现出与对应的 EEG 不同的特点。

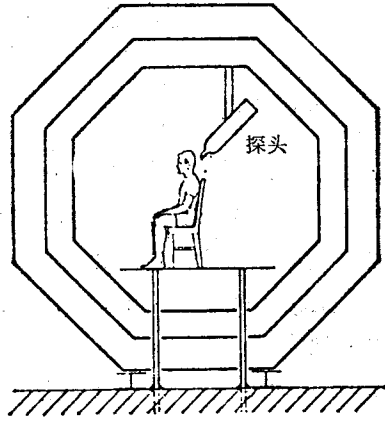


图7 用 SQUID 系统在磁屏蔽室内测 MEG

更有意义的是诱发脑磁场响应,如视觉诱发脑磁场响应(VEF)、听觉诱发脑磁场响应(AEF)、躯体诱发脑磁场响应(SEF)等,在这些方面,美国纽约大学和麻省理工学院、芬兰赫尔辛基技术大学等有关专家们做了许多工作^[12],取得了一些很有价值的结果。这些结果将在生理学、组织学、病理学等的研究上起到重要作用。

现已证明,测量 MEG 比测量 EEG 有许多明显的优点。例如:(1) MEG 既不需要参考点也不需要与皮肤接触,不会出现由此引起的伪差;(2) 头盖骨有很高的阻抗,常使得 EEG 模糊不清,但对低频磁场是穿透的,使得 MEG 不受影响,就象打开头盖骨直接量脑电流一样;(3) MEG 能直接反映脑内场源的活动状态,对 MEG 进行反解析,能准确确定场源的强度和位置,EEG 反映的只是头皮表面回路电位差,与脑内部的实际情况有很大差异;(4) VEF、AEF、SEF 等有很强的特异性,可以分辨出组织上和功能上不同的细胞群体,而诱发脑电响应是各向同性的,不能取得上述效果等等。

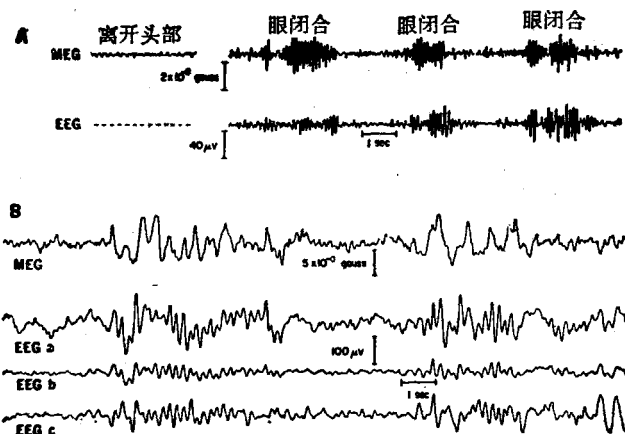


图8 MEG 与 EEG 之比较

3. 肺磁场 它是由强磁性污染物质所产生的。1973年 D. Cohen 首先探测出来^[13]。方法如下：先用工频消磁器在人体胸部缓慢移动，使强磁性污染物质去磁，以 5cm 为间隔逐点测量，做出第一张肺磁图 (MPG)；然后，在胸部施加人工磁场 (300—1000GS)，使强磁性污染物质磁化，做出第二张肺磁图；再将第二张肺磁图减去第一张肺磁图对应点的数据，从而得到第三张肺磁图，这就是强磁性污染物质的剩余场在肺中的分布图。图 9 是肺磁场和腹部磁场分布示意图。

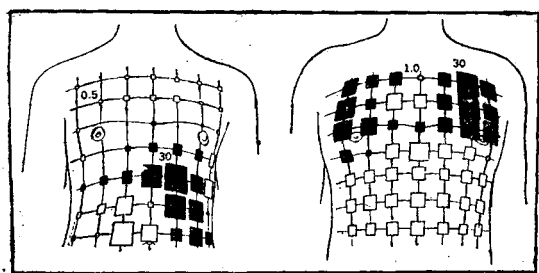


图9 肺磁场和腹部磁场分布示意图

肺磁场研究已经取得一定进展，并已开始向临床过度。它的主要用途有：

(1) 做为职业病检查的灵敏指示器。石棉对人体有害，而石棉中总含有一些强磁性物质 (Fe_3O_4 、 Fe_2O_3)。测出肺磁场强度，又定出石棉中强磁性物质的含量，便可确定肺中石棉的含量。其它如煤矿工人、钢铁工人、电焊工人等，也可以用同样的方法确定肺中的那些有害物质的含量。近几年来，美国、芬兰等一些国家做了

许多工作。1981年，我们用磁通门式梯度计检查了约 250 名受试者，其中有电焊工、磨床工、砂轮磨工、车工、石棉粉碎工等，已经取得了初步成果。预计在不久的将来，此种探测手段在对“铁尘肺”、“石棉肺”、“煤肺”等一类职业病的早期诊断上和改善劳动卫生条件上可发挥重要的作用。

(2) 做为肺自清除异物的灵敏指示器。纯磁铁矿粉末 (平均直径为 1—4 μm) 是非溶性的，不改变生理上的 pH 值，对人体无甚害处。与“放射性示踪”比较，“磁示踪”是比较安全的，且能跟踪较长时间。实践表明，吸入 20 μg 磁铁矿粉末可用 SQUID 系统在磁屏蔽室内测量，吸入 200 μg 磁铁矿粉末可用磁通门式梯度计在不屏蔽的情况下测量。目前情况下，对于在有害粉尘下作业的工人和在较严重的城市工业污染 (空气污染) 下生活的人们，鉴定肺自清除异物的能力是必要的。受试者吸入一定量的磁铁矿粉末，用磁强计定期测量，做出随时间衰减曲线，即可得出肺自清除异物能力的特性。不久前，D. Cohen 做了一组吸烟者与不吸烟者对比的清除曲线，跟踪时间长达一年^[14]。结果表明，吸入磁铁矿粉末 5 个月后，不吸烟者已排除 80%，而吸烟

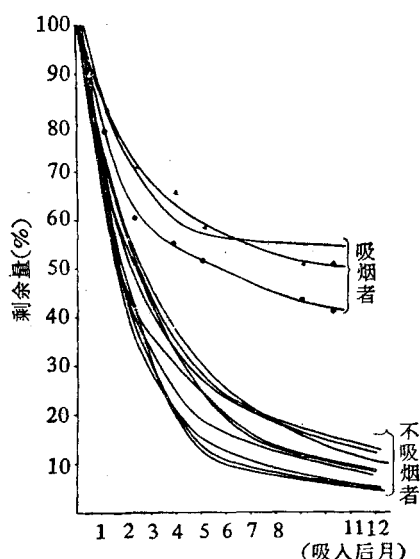


图10 肺部自清除曲线

者只排除 45%；11 个月后，不吸烟者已排除 90%，而吸烟者只排除 50%。可见，吸烟者的自清除能力远不如不吸烟者。图 10 是这组实验的自清除曲线图。吸烟者排除异物能力的降低，是由于吸烟损伤了肺泡的功能，这可能是吸烟者容易患肺癌、肺气肿和肺纤维性病变的原因之一。

4. 视网膜磁场 它由视网膜电流产生。最近已用超导量子干涉式磁强计测出。其随时间的变化叫视网膜磁图(MRG)，它可以用于检查眼睛的某些疾病。与视网膜电图(ERG)相比，受试者与探测器之间没有肉体上的接触，从而避免了接触电位和参考点的影响。另外，MRG 能提供更多的信息，是一种潜在的临床手段。

5. 肝磁化率测量 近几年来，美国一些大学用超导量子干涉式磁强计测量心、肝、脾组织磁化率的变化，用以诊断某些疾病^[15,16]。如在肝中， $\eta < 10^{-5}$ (即含铁量不足)是单纯性营养不良； $\eta > 10^{-2}$ (即含铁量过剩)是“库利氏贫血”症和“色素性肝硬化”症。与其它诊断手段相比，这是一种快速、非侵入，无损伤的诊断手段。目前已取得初步成果，为临床应用打下了基础。

结 语

人体磁性活动的研究至今只有十几年的历史。目前，这方面的研究多处于方法与理论的探讨阶段，有的刚开始向临床过渡。由于生物磁信号有许多独特的优点，并能与生物电信号互相印证和取长补短，一些欧美国家对这一研

究领域非常重视，许多物理学家、生物物理学家、生物学家、医学家等投入这一新领域。目前，这方面的研究已经受到我国有关单位的注意。一些科学工作者初步开展了这方面的研究，如南开大学和一些单位协作，在人体磁场研究上取得了初步成果。此外，近几年来我国在气功、经络和人体特异功能的研究中，发现一些有关电磁活动现象。可以预计，人体磁性活动研究将对人体科学的基础研究和生物学中的应用，乃至最终揭示生命活动的奥秘做出重要贡献。

参 考 文 献

- [1] Baule, G. and McFee, R.: *Am. Heart. J.*, **66**, 95, 1963.
- [2] Cohen, D.: *Rev. Phys. Appl.*, **5**, 53, 1970.
- [3] Cohen, D.: *IEEE Trans. Magn.*, **6**, 344, 1970.
- [4] Stroink, G. et al.: *Third Workshop on Biomagnetism*, Berlin. p. 289, 1980.
- [5] Van Bree, J. L. M. J. et al.: *Appl. Sci. Res.*, **29**, 59, 1974.
- [6] Williamson, S. J. et al.: *Future Trends in Superconductive Electronics*, 160, 1978.
- [7] Brenner, D. et al.: *IEEE Trans. Magn.*, **13**, 365, 1977.
- [8] Hess, D. W.: in ref. [4], p. 261.
- [9] Eghrari, I. R. et al.: in ref. [4], p. 222.
- [10] Cohen, D.: *Science*, **161**, 784, 1968.
- [11] Cohen, D.: *Science*, **175**, 664, 1972.
- [12] Williamson, S. J. and Kaufman, L.: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **22**, 129, 1981.
- [13] Cohen, D.: *Science*, **180**, 745, 1973.
- [14] Cohen, D.: *Science*, **204**, 514, 1979.
- [15] Farrell, D. E. et al.: in ref. [4], p. 212.
- [16] Bastuscheck, C. M. et al.: in ref. [4], p. 216.

[本文于1981年8月26日收到]

粘菌的自组织现象及其对生物学研究的意义*

王 身 立

(复旦大学遗传研究所)

盘基网柄菌 (*Dictyostelium discoideum*) 是粘菌的代表种。孢子是它新一代生命的开始。孢子在温湿的环境中萌发，形成变形虫状的单

细胞动物体。它能伸出伪足捕食细菌。当营养

* 本文是作者1981年“生物自组织讨论会”上发言部分内容，经补充修改而成。