

電磁場が染色体に及ぼす影響

飯 島 純 夫

山梨医科大学医学部看護学科地域・老人看護学講座

抄 録: 近年、電磁場の生体への影響に関心が持たれるようになってきた。1979年に、送電線下の小児白血病発生率が対照に比べて高いと報告されて以来、電磁場と発がんとの関連は現在まで議論されているが、結論がでていない。発癌性は変異原性と密接に関連しており、発癌性があるとすると、その前段階として変異原性もある可能性が高い。変異原性とは、遺伝子突然変異と染色体への影響が含まれる。本稿では、電磁場による染色体への影響に関する過去の主な知見について総説した。

定常磁場単独では、現在までのところ数テスラといった相当の強磁場でも変異原性は認められていない。また、超低周波変動磁場の染色体への影響も、ごく一部を除き大部分が陰性の報告である。そこで、筆者らは感受性の高い系のヒト精子染色体によって、超低周波磁場単独および既知変異原との複合影響について検討した。既知変異原としてはブレオマイシン (BLM) と N-メチル-N'-ニトロ-N-ニトロソグアニジン (MNNG) を選んだ。両既知変異原に関し、染色体異常を持つ精子出現率にも染色体異常をタイプ別に分類した場合でも、曝露群と非曝露群との間に差は認められなかった。これらの結果は BLM と MNNG による DNA 損傷の増幅作用が、超低周波磁場曝露にはなかったことを示唆している。

いずれにしても、現段階では、変異原性に関しては、電磁場の場合、まったくないか、あったとしても非常に弱いものと考えられる。

キーワード 電磁場, 染色体異常, 精子染色体, ブレオマイシン, MNNG

1. はじめに

近年、MRI、携帯電話などの普及により電磁場の生体への影響に関心が持たれるようになってきた。1979年に Wertheimer and Leeper¹⁾が、送電線の下に住む小児の白血病の発生率が対照に比べて 1.6 ~ 2 倍高いと報告して以来、電磁場と発がんとの関連は現在に至るまで議論されており、未だ結論がでていない状況にある。上記論文の他にも疫学的に電磁場の発癌性を示唆する論文がいくつかみられる²⁻⁷⁾が、同時に発

癌性を否定する報告⁸⁻¹²⁾もある。電磁場にもし発癌性があるとすると、動物実験でも同様の結果が期待されるはずである。しかし、現在までのところ動物実験によって電磁場の発癌性は証明されていない。

発癌性は変異原性と密接に関連していることが近年の研究で明らかになっていることから、電磁場に発癌性があるとすると、その前段階として変異原性もある可能性が高い。変異原性とは広義には遺伝子突然変異と染色体変異を含んでいるが、ここでは染色体変異のみについて述べることにする。さらに、染色体変異としては、変異原性との関連では染色体異常と姉妹染色分体交換 (Sister chromatid exchange ; 以下 SCE

〒 409-3898 山梨県中巨摩郡玉穂町下河東 1110

受付：1998年12月24日

受理：1999年2月16日

と略)が主要なものであるので、主としてこの2つの指標について述べることにする。SCE {染色体のそれぞれの染色分体(姉妹染色分体)が一見、同一の部位で完全に入れ替わる現象のこと}も染色体異常もその生成は発癌にいたる可能性が示唆されている。そこで、本論文では著者らが行ってきた研究を含む電磁場による染色体への影響に関する過去の主な知見について総説したい。

なお、電磁場は時間とともに変化しない定常磁場(静磁場ともいう)と変化する変動磁場(特に低周波が問題とされる)とに大別されるので、以下ではこの2つの分類に従って述べることにする。

2. 定常磁場が染色体に及ぼす影響

Wolffらは一連の研究^{13,14)}により、CHO細胞でもヒト末梢血リンパ球でも数テスラという強定常磁場が染色体異常、SCE、DNA合成能のいずれにも有意な影響を及ぼさなかったことを報告している。同様の結果はヒト末梢血リンパ球を用いた実験で報告されている^{15,20)}。筆者らの研究¹⁶⁻¹⁹⁾でも定常磁場の場合には、0.8Tまでの磁場強度で染色体異常もSCEも認められなかった。このように現在までのところ定常磁場によって染色体異常および、SCEが誘発されたという報告はみられていない。しかし、染色体異常の簡便な検出法の1つである小核試験では、マウスの骨髄赤芽球系細胞の小核誘発頻度が4.7Tという高定常磁場の単独曝露でも化学物質との複合曝露でも有意に増加するという結果が報告されている²¹⁾。微生物を用いた変異原性試験であるエームテストでは、11.7Tという極めて高い定常磁場でも変異原性はなかったと報告されている²²⁾。同じ研究グループのCHL細胞を用いたin vitro小核試験でも単独曝露の場合には小核の有意な増加はみられていない²²⁾。筆者らはこれまでに、定常磁場(400, 800 mT)によるヒト末梢血リンパ球でのSCE頻度、定常磁場(800 mT)と

X線(1, 2, 4 Gy)を複合させた場合のヒト末梢血リンパ球での染色体構造異常頻度、ESR(Electron Spin Resonance; 電子スピン共鳴装置)からの磁場(50, 150, 450, 1350 mT)によるヒト末梢血リンパ球およびマウス大腿骨骨髓細胞でのSCE頻度、の3つの実験を定常磁場を用いて行ってきたが、これらの一連の実験結果はいずれも陰性であり、過去の知見と類似していた²³⁾。以上の知見から、定常磁場単独ではかなりの強磁場でも変異原性は認められないといっていると思われる。

3. 低周波変動磁場の染色体に及ぼす影響

変動磁場は周波数を持っており、周波数が300 Hz以下の磁場が低周波磁場と定義されている。この低周波磁場の中でも、疫学的に発癌性との関連が示唆されているのは周波数が50 Hzないし60 Hzの交流に由来する超低周波変動磁場といわれるものである。しかし、超低周波変動磁場の染色体への影響に関しては、マウスでもヒトリンパ球でもCHO細胞でも大部分が陰性の報告である²⁴⁻²⁹⁾。しかし、2つの陽性結果が報告されている^{30,31)}。これらはいずれもパルス磁場を用いたものであるので、パルス磁場として曝露させた場合、条件によっては染色体への影響がある可能性が示唆されている。また、磁場単独ではなく他の既知変異原物質と複合させた場合にSCEがやや増加したという報告もある³²⁾。マウスの小核試験では50 Hzの電磁場で有意に高頻度な小核誘発が報告されている³³⁾。低周波変動磁場による染色体変異に関しては多くの陰性の報告とともにこれらいくつかの陽性の報告があるので、今後さらに多くの知見を集積していくことが必要とされよう。

4. 超低周波磁場のヒト精子染色体に及ぼす影響

前項までに述べたように、現在までのところごく一部の報告を除き、電磁場によってはっきりとした変異原性はみられていない。また、電

磁場は発癌のイニシエーターというよりもプロモーターである可能性が示唆されている。そこで、高感受性の系の開発と他の化学物質との複合影響観察の必要性が示唆される。そこで、筆者らは化学物質によって感受性の高い系であることがわかっているヒト精子染色体を用いた系によって、超低周波磁場単独および既知変異原と複合させた場合の影響について検討した。超低周波磁場単独の場合には、曝露群と対照群との間に、染色体異常出現率でも、染色体異常の種類でも、有意な差は認められなかった³⁴⁾。また、既知変異原として、プレオマイシン (BLM) と N-メチル-N'-ニトロ-N-ニトロソグアニジン (MNNG) を選び、電磁場 (50 Hz, 20 mT) との複合影響に関する検討を行った³⁵⁾。

その結果表1のように、BLMとMNNGに関し、磁場曝露群 (+) と非磁場曝露群 (-) における構造的染色体異常を持つ精子の出現率は有意な差は認められなかった³⁵⁾。また、観察

表1. 化学物質と磁場に曝露したヒト精子における構造的染色体異常の出現率³⁵⁾

化学物質	磁場曝露	分析精子数	染色体異常精子数 (%)
BLM	-	290	50 (17.2)
	+	303	54 (17.8)
MNNG	-	325	34 (10.5)
	+	252	31 (12.3)
	-	157	26 (16.6)
	+	86	15 (17.4)

された構造的染色体異常をタイプ別に分類した場合でも、磁場曝露群 (+) と非磁場曝露群 (-) との間に有意差は認められなかった (表2)³⁵⁾。これらの結果はBLMとMNNGによって生じたDNA損傷を増幅させるような作用が、超低周波磁場曝露にはなかったことを示唆している。

5. おわりに

以上のようにこれまでの電磁場による染色体への影響に関する研究を概観した。定常磁場では高磁場でも染色体への影響はみられず、低周波変動磁場の場合には、大部分は陰性結果であるが、パルス磁場として曝露させた場合に、染色体異常発生率が有意に高かったという報告がみられる。また、筆者らは高感受性の系と考えられるヒト精子染色体に及ぼす影響に関する研究を行ってきたが、有意な影響は観察されなかった。しかし、この研究で用いられた化学物質は限られており、超低周波磁場の強度や曝露時間も固定されていたため、さらに実験条件を変えて検討する必要がある。また一方ではさらなる高感受性の系の開発も必要であろう。

いずれにしても、現段階では、発癌性の前段階と考えられる変異原性に関しては、電磁場の場合、まったくないか、あったとしても非常に弱いものと考えられる。

表2. 化学物質と磁場に曝露したヒト精子における構造的染色体異常のタイプと頻度³⁵⁾

化学物質	磁場曝露	タイプ別にみた構造的染色体異常数 (精子当たり)				
		染色体型切断	染色体型交換	染色分体型切断	染色分体型交換	全異常
BLM	-	118 (0.407)	15 (0.052)	9 (0.031)	12 (0.041)	154 (0.531)
	+	103 (0.334)	18 (0.059)	6 (0.020)	6 (0.020)	133 (0.439)
MNNG	-	30 (0.092)	4 (0.012)	7 (0.022)	3 (0.009)	44 (0.135)
	+	28 (0.111)	2 (0.008)	6 (0.024)	2 (0.008)	38 (0.151)
	-	17 (0.108)	2 (0.013)	8 (0.051)	5 (0.032)	32 (0.204)
	+	11 (0.128)	0	7 (0.081)	1 (0.012)	19 (0.221)

文 献

- 1) Wertheimer N, Leeper E: Electrical wiring configurations and childhood cancer. *Am J Epidemiol* 1979; **109**: 273-284.
- 2) Tomenius L: 50-Hz electromagnetic environments and the incidence of childhood tumors in Stockholm County. *Bioelectromagnetics* 1986; **7**: 191-207.
- 3) Savitz DA, John EM, Kleckner RC: Magnetic field exposure from electric appliances and childhood cancer. *Am J Epidemiol* 1990; **131**: 763-773.
- 4) Olsen JH, Nielsen A, Schlgen G: Residence near high voltage facilities and risk of cancer in children. *BMJ* 1993; **307**: 891-895.
- 5) Feychting M, Ahlbom A: Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high-voltage power lines. *Am J Epidemiol* 1993; **138**: 467-481.
- 6) Kraut A, Tate R, Tran N: Residential electric consumption and childhood cancer in Canada (1971-1986). *Archi Environ Health* 1994; **49**: 156-159.
- 7) Feychting M, Schlgen G, Olsen JH, Ahlbom A: Magnetic fields and childhood cancer— a pooled analysis of two Scandinavian studies. *Eur J Cancer* 1995; **31**: 2035-2039.
- 8) Fulton JP, Cobb S, Preble L, Leone L, Forman E: Electrical wiring configurations and childhood leukemia in Rhode Island. *Am J Epidemiol* 1980; **111**: 292-296.
- 9) Myers A, Cartwright RA, Bonnell JA: Overhead power lines and childhood cancer. Technical Report, Proceedings of the International Conference on Electric and Magnetic Fields in Medicine and Biology 1985.
- 10) London SJ, Thomas DC, Bowman JD, Sobel E, Cheng TC, Peters JM: Exposure to residential electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia. *Am J Epidemiol* 1991; **134**: 923-937.
- 11) Schreiber GH, Swaen GM, Meijers JM, Slangen JJ, Sturmans F: Cancer mortality and residence near electricity transmission equipment: a retrospective cohort study. *Int J Epidemiol* 1993; **22**: 9-15.
- 12) Washburn EP, Orza MJ, Berlin JA, Nicholson WJ, Todd AC, Frumkin H, Chalmers TC: Residential proximity to electricity transmission and distribution equipment and risk of childhood leukemia, childhood lymphoma, and childhood nervous system tumors: systematic review, evaluation, and meta-analysis. *Cancer Causes Control* 1994; **5**: 29-309.
- 13) Wolff S, Crooks LE, Brown P, Howard R, Painter RB: Tests for DNA and chromosomal damage induced by nuclear magnetic resonance imaging. *Radiology* 1980; **136**: 707-710.
- 14) Wolff S, James TL, Young GB, Margulis AR, Bodycote J, Afzal V: Magnetic Resonance Imaging: Absence of in vitro cytogenetic damage. *Radiology* 1985; **55**: 163-165.
- 15) Cooke P, Morris PG: The effects of NMR exposure on living organisms. A genetic study of human lymphocytes. *Br J Radiol* 1981; **54**: 622-625.
- 16) 飯島純夫, 竹下達也, 日暮 眞: 磁場曝露によるヒト末梢血リンパ球での姉妹染色分体交換の誘発について. *日本衛生学雑誌* 1988; **43**: 243.
- 17) 飯島純夫, 山縣然太郎, 竹下達也, 日暮 眞: 磁場曝露によるヒト末梢血リンパ球での染色体変異について. *日本衛生学雑誌*, 1989; **44**: 472.
- 18) 飯島純夫, 竹下 達也, 山縣然太郎, 日暮 眞: 磁場曝露によるヒト末梢血リンパ球での染色体変異について (第2報). *日本衛生学雑誌*, 1990; **45**: 551.
- 19) Iijima S, Yamagata Z, Ooma T, Takeshita T, Higurashi M, Asaka A.: Effects of static magnetic fields on the induction of sister chromatid exchanges in human lymphocytes in vitro. *Yamanashi Med J* 1993; **8**: 9-13.
- 20) Peteiro-Cartelle FJ, Cabezas-Cerrato J: Absence of kinetic and cytogenetic effects on human lymphocytes exposed to static magnetic fields. *J Bioelectricity* 1989; **8**: 11-19.
- 21) 鈴木勇司, 福本正勝, 小此木英男, 清水英佑: 高磁場の染色体異常誘発能 (2) マウス小核試験による白血病誘発物質の検討. 第65回日本産業衛生学会講演集, 1992; **238**.
- 22) 清水英佑, 鈴木勇司. 特集「電磁場と発がん」, 変異原性に関する研究. *癌の臨床*, 1998; **44**: 1464-1468.
- 23) 飯島純夫. 特集「電磁場と発がん」, 染色体異常に関する研究. *癌の臨床* 1998; **44**: 1469-1473.
- 24) Bauchinger M, Hauf R, Schmid E, Dresch J: Analysis of structural chromosome changes and SCE after occupational long-term exposure to electric and magnetic fields from 380kV systems. *Radiat Environ Biophys* 1981; **19**: 235-238.
- 25) Nordenson I, Hansson-Mild K, Nordstrom S, Sweins A, Birke E: Clastogenic effects in human lymphocytes of power frequency electric fields: In vivo and in vitro studies. *Radiat Environ Biophys* 1984; **23**: 191-201.
- 26) Cohen MM, Kunska A, Astemborski JA, McCulloch D, Paskewitz DA: Effect of low-level 60-Hz electromagnetic fields on human lymphoid cells,

- . Mitotic rate and chromosome breakage in human peripheral lymphocytes. *Bioelectromagnetics* 1986; **7**: 415–423.
- 27) Cohen MM, Kunska A, Astemborski JA, McCulloch D: The effect of low-level 60-Hz electromagnetic fields on human lymphoid cells, . Sister-chromatid exchanges in peripheral lymphocytes and lymphoblastoid cell lines. *Mutat Res* 1986; **172**: 177–184.
- 28) Takahashi K, Kaneko I, Date M, Fukada E: Influence of pulsing electromagnetic field on the frequency of sister-chromatid exchanges in cultured mammalian cells. *Experientia* 1987; **43**: 331–332.
- 29) Garcia-Sagredo JM, Parada LA, Monteagudo JL: Effect on SCE in human chromosomes in vitro of low-level pulsed magnetic field. *Environ Mol Mut* 1990; **16**: 185–188.
- 30) Garcia-Sagredo JM, Monteagudo JL: Effects of low-level pulsed electromagnetic fields on human chromosomes in vitro: analysis of chromosomal aberrations. *Hereditas* 1991; **115**: 9–11.
- 31) Khalil AM, Qassem W: Cytogenetic effect of pulsing electromagnetic field on human lymphocytes in vitro: chromosome aberrations, sister-chromatid exchanges and cell kinetics. *Mutat Res* 1991; **247**: 141–146.
- 32) Rosenthal M, Obe G: Effects of 50-hertz electromagnetic fields on proliferation and on chromosomal alterations in human peripheral lymphocytes untreated or pretreated with chemical mutagens. *Mutat Res* 1989; **210**(2): 329–335.
- 33) EL Nahas SM, Oraby HA: Micronuclei formation in somatic cells of mice exposed to 50-Hz electric fields. *Environ Mol Mut* 1989; **13**: 107–111.
- 34) Tateno H, Iijima S, Nakanishi Y, Kamiguchi Y, Asaka A: No induction of chromosome aberrations in human spermatozoa exposed to extremely low frequency electromagnetic fields. *Mutat Res* 1998; **414**: 31–35.
- 35) 飯島純夫, 立野裕幸. 超低周波磁場のヒト精子染色体に及ぼす影響に関する研究. 平成9年度文部省科学研究費補助金「基盤研究」研究成果報告書. 1998.

Effects of Electromagnetic Fields on Chromosomes

Sumio Iijima

Department of Community Health and Gerontological Nursing

Recently public concern about the carcinogenic effects of electromagnetic fields, especially extremely low frequency magnetic fields (ELF), has been increasing. However, the results of previous studies on ELF and cancer have been still controversial. If ELF has carcinogenicity, it might have mutagenicity also. As for the mutagenicity of ELF, few reports demonstrated positive results either in mutation of DNA or in chromosome aberration and sister chromatid exchange. We also observed that static magnetic fields did not affect human chromosomes, and that neither ELF alone nor ELF combined with known chemical mutagens, such as bleomycin and MNNG, did affect human sperm chromosomes.

Key words: Electromagnetic fields, Chromosome aberration, Sperm chromosome