

図9 磁界ばく露における顆粒球貪食能に及ぼす影響についての検討  
 Aは短期（3日間）ばく露、Bは長期（14日間）ばく露の結果を示す。  
 いずれのグラフも蛍光ビーズと1時間混合した際の蛍光ビーズを取り込んだ顆粒球の割合を示す。  
 Cは蛍光ビーズと混合した顆粒球の蛍光顕微鏡像であり、矢印のところにある細胞が蛍光ビーズを貪食している。

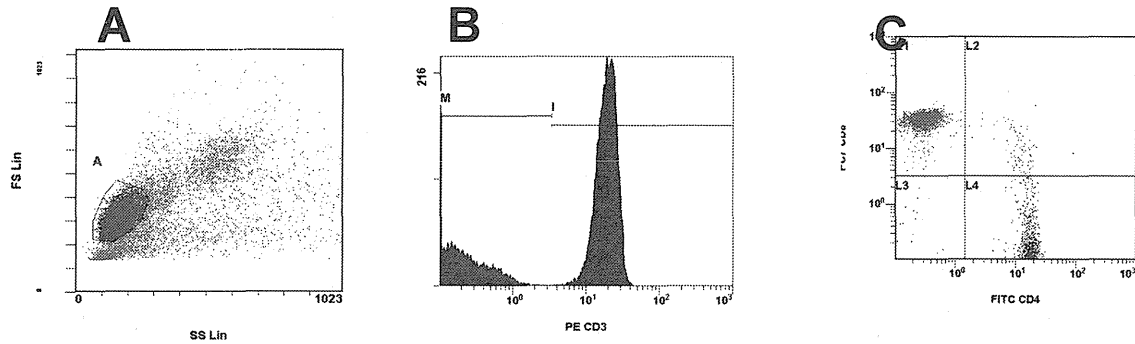


図 10 T細胞サブセット解析における解析例

- A 末梢血リンパ球画分の Side Scatter/Forward Scatter の Dot plot 表示
- B A 図の赤く囲った領域でゲーティングした細胞群における CD3 positive cell の検出
- C B 図の CD3 positive cell 群 における CD4/CD8 Dot Plot 表示

表 5 長期 (14 日間) ばく露血液サンプルにおける T 細胞サブセット解析の結果

	cage control (n=11)	Sham(n=12)	3.8mT(n=12)
CD4/CD8比	1.82 ± 0.16	2.03 ± 0.34	2.00 ± 0.28
CD8+/CD4+(%)	1.68 ± 0.41	1.54 ± 0.21	1.53 ± 0.40
CD8-/CD4-(%)	0.73 ± 0.73	0.77 ± 0.78	0.77 ± 0.43

%は CD3 陽性細胞に対する割合を示す。

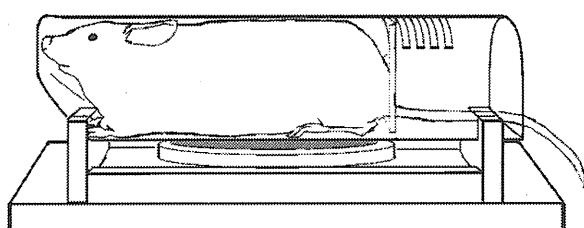
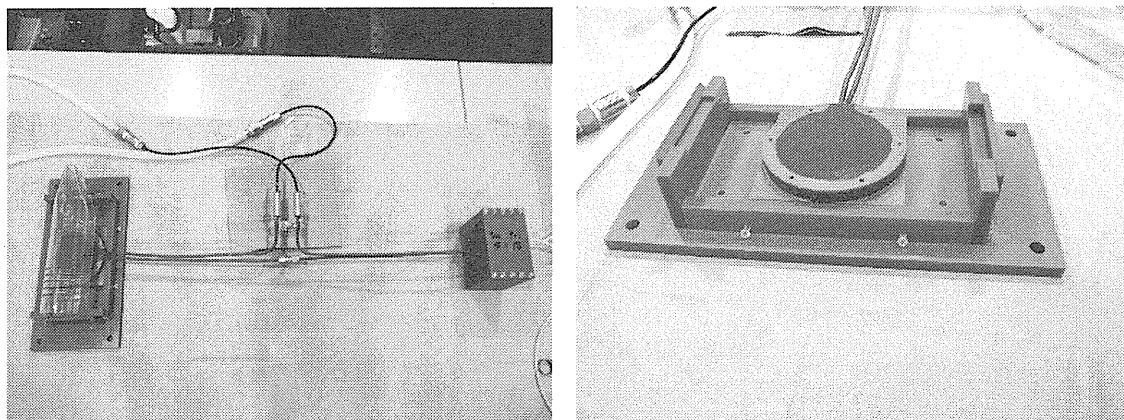


図11 磁界ばく露装置の概要

(左上) コイルとコンデンサ、(右上) コイル拡大写真、(下) ラットのばく露中の模式図

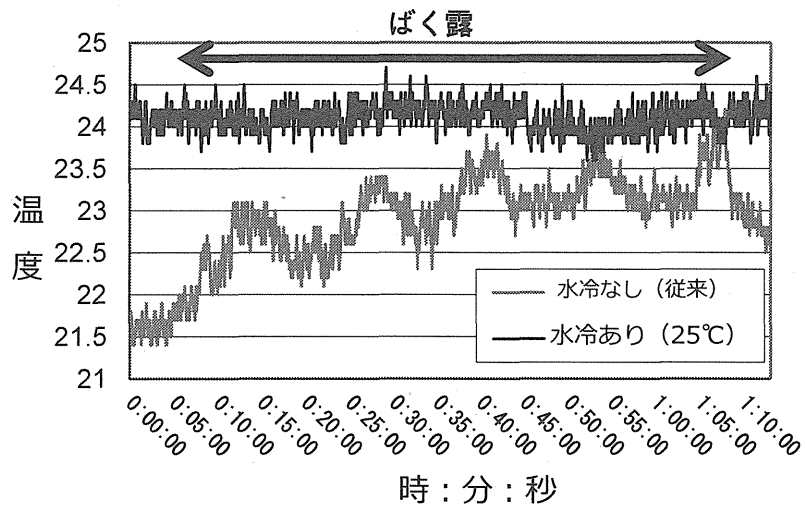
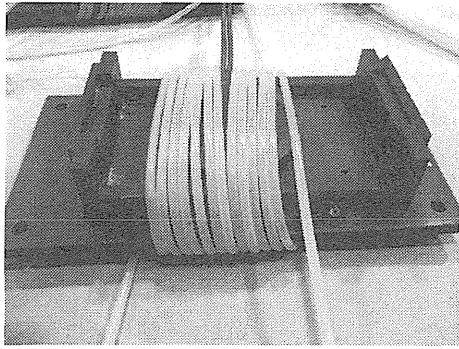


図12 ばく露装置から発生する温度を一定にするための改造  
 (上) コイルに水冷用ループ装着した状態  
 (下) 水冷あり、なしによるラットホルダー内の温度変化

表6 母獣の妊娠期間の体重変化

		ばく露	シャム	ケージコントロール
母獣の数		20	20	20
妊娠中の体重	妊娠0日	220 ± 9	219 ± 10	221 ± 11
	7日	245 ± 10	246 ± 13	248 ± 13
	18日	302 ± 9	309 ± 19	323 ± 22
	20日	333 ± 17	329 ± 31	347 ± 22
体重増加量(g)				
妊娠0日～20日まで		112 ± 15	110 ± 27	126 ± 18
ばく露期間(妊娠7日～17日まで)		50 ± 9	50 ± 8	61 ± 10

表7 母獣の血液生化学的検査

			高ばく露	シャム	ケージコントロール
ALB	血中アルブミン	g/dL	3.46 ± 0.38	3.48 ± 0.30	3.68 ± 0.44
ALP	アルカリ性ホスファターゼ	IU/L	136.85 ± 59.15	146.85 ± 52.13	138.20 ± 50.69
ALT	GPT	IU/L	46.75 ± 7.33	46.35 ± 10.48	49.90 ± 6.36
AMY	アミラーゼ	IU/L	1300.8 ± 153.7	1268.4 ± 92.0	1221.3 ± 133.3
TBIL	総ビリルビン	mg/dL	0.30 ± 0.00	0.30 ± 0.00	0.29 ± 0.03
BUN	尿素窒素	mg/dL	17.35 ± 3.42	16.90 ± 2.63	17.50 ± 2.31
CA	カルシウム	mg/dL	10.09 ± 0.65	10.10 ± 0.32	10.23 ± 0.42
PHOS	リン	mg/dL	6.26 ± 1.06	5.88 ± 1.12	6.42 ± 1.01
CRE	クレアチニン	mg/dL	0.36 ± 0.08	0.31 ± 0.11	0.32 ± 0.09
GLU	グルコース	mg/dL	161.0 ± 35.1	157.4 ± 18.8	171.9 ± 27.1
NA	ナトリウム	mmol/L	133.8 ± 2.1	134.3 ± 2.1	134.6 ± 1.4
K	カリウム	mmol/L	5.43 ± 0.70	5.33 ± 0.61	5.61 ± 0.64
TP	総タンパク質	g/dL	5.79 ± 0.36	5.85 ± 0.35	5.96 ± 0.42
GLOB	グロブリン	g/dL	2.33 ± 0.19	2.40 ± 0.19	2.26 ± 0.20

表8 母獣の血球検査

条件			高ばく露	シャム	ケージコントロール
WBC	白血球	10 <sup>6</sup> /mL	8.26 ± 2.09	11.14 ± 4.49	9.31 ± 3.78
LYM	リンパ球	10 <sup>6</sup> /mL	4.54 ± 1.94	6.78 ± 3.57	5.92 ± 3.27
MON	単球	10 <sup>6</sup> /mL	0.58 ± 0.20	0.68 ± 0.40	0.60 ± 0.33
GRA	顆粒球	10 <sup>6</sup> /mL	3.15 ± 1.02	3.69 ± 1.34	2.80 ± 1.23
RBC	赤血球	10 <sup>9</sup> /mL	6.38 ± 0.29	6.47 ± 0.38	6.31 ± 0.39
HGB	ヘモグロビン	g/dL	12.24 ± 0.71	12.21 ± 0.73	11.86 ± 0.70
HCT	ヘマトクリット	%	34.60 ± 1.86	34.95 ± 1.95	34.06 ± 1.95
MCV	赤血球容量	fl	54.10 ± 2.15	54.10 ± 1.59	54.00 ± 1.95
MCH	平均ヘモグロビン量	pg	19.18 ± 0.59	18.88 ± 0.61	18.83 ± 0.62
MCHC	平均ヘモグロビン濃度	g/dL	35.37 ± 1.12	34.91 ± 0.86	34.88 ± 1.15
RDWc	赤血球分布幅	%	13.94 ± 0.47	14.15 ± 0.48	14.28 ± 0.64
PLT	血小板	10 <sup>6</sup> /ml	620.1 ± 216.2	582.5 ± 232.4	608.6 ± 221.3
PCT	血小板%	%	0.45 ± 0.14	0.43 ± 0.15	0.47 ± 0.15
MPV	平均血小板容量	fl	7.50 ± 0.97	7.70 ± 1.07	7.97 ± 0.91
PDWc	血小板分布幅	%	33.39 ± 2.25	34.18 ± 2.44	34.35 ± 2.70

表9 ラット胎児の着床数および生存胎児数と体重

	ばく露			シヤム			ケージコントロール		
母獣の総数	20			20			20		
着床総数	271			276			262		
	13.6	±	1.7	13.8	±	1.2	13.5	±	1.4
着床痕数	11			11			16		
死亡胎児	1			2			1		
着床痕+死亡胎児	12			13			17		
総生存胎児	259			263			245		
親あたりの生存胎児数	13.0	±	2.0	13.2	±	1.2	12.3	±	1.9
胎児性比	127	:	132	138	:	125	131	:	114
オス出現率(%)	49.0			52.4			53.4		
雌親あたりのオス出現率(%)	48.8	±	13.0	52.9	±	11.8	53.0	±	9.5
胎児体重(オス)(g)	3.49	±	0.35	3.55	±	0.30	3.62	±	0.39
胎児体重(メス)(g)	3.34	±	0.29	3.38	±	0.33	3.40	±	0.39

表10 ラット胎児検体における奇形発生

	ばく露	シャム	ケージコントロール	合計
<b>外表奇形</b>				
検査胎児数	128 / 20	130 / 20	122 / 20	380 / 60
異常胎児数 (異常胎児 %)	0 / 0 0%	0 / 0 0%	0 / 0 0%	0 / 0 0%
<b>内臓奇形</b>				
検査胎児数	128 / 20	130 / 20	122 / 20	380 / 60
異常胎児数 (異常胎児 %)	0 / 0 0	2 / 2 1.5%	2 / 2 1.6%	4 / 4 1.1%
(内訳 <sup>*1</sup> )				
鎖骨下動脈起始異常	0 / 0	0 / 0	1 / 1	1 / 1
鎖骨下動脈食道後方走行	0 / 0	0 / 0	1 / 1	1 / 1
心室中隔膜性部欠損	0 / 0	0 / 0	1 / 1	1 / 1
心室中隔膜筋性部欠損	0 / 0	1 / 1	0 / 0	1 / 1
心房中隔欠損	0 / 0	1 / 1	0 / 0	1 / 1
<b>骨格奇形</b>				
検査胎児数	131 / 20	133 / 20	123 / 20	387 / 60
異常胎児数 (異常胎児 %)	1 / 1 0.8%	5 / 3 3.8%	0 / 0 0%	6 / 4 1.6%
(内訳)				
胸椎体二分骨化	1 / 1	5 / 3	0 / 0	6 / 4
<b>奇形合計</b>				
検査胎児数	259 / 20	263 / 20	245 / 20	767 / 60
異常胎児数 (異常胎児 %)	1 / 1 0.4%	7 / 4 2.7%	2 / 2 0.8%	10 / 7 1.3%

\*1 重複した項目もある。



表11 ラット胎児検体における変異発生

	ばく露	シヤム	ケージコントロール	合計
<b>外表変異</b>				
検査胎児数	128 / 20	130 / 20	122 / 20	380 / 60
異常胎児数 (異常胎児 %)	37 / 16 28.9%	46 / 19 35.3%	47 / 17 38.5%	130 / 52 34.2%
(内訳) 口蓋ヒダ不整列	37 / 16	46 / 19	47 / 17	130 / 52
<b>内臓変異</b>				
検査胎児数	128 / 20	130 / 20	122 / 20	380 / 60
異常胎児数 (異常胎児 %)	30 / 17 23.4%	49 / 16 37.6%	35 / 18 28.6%	114 / 51 30.0%
(内訳*) 胸腺頸部遺残	26 / 16	46 / 15	31 / 18	103 / 49
左臍帯動脈	4 / 3	1 / 1	3 / 3	8 / 7
肝分葉過剰裂	1 / 1	5 / 4	3 / 3	9 / 8
<b>骨格変異</b>				
検査胎児数	131 / 20	133 / 20	123 / 20	387 / 60
異常胎児数 (異常胎児 %)	20 / 9 15.2%	26 / 14 19.5%	21 / 13 15.7%	67 / 36 17.3%
(内訳*) 胸椎体ダンベル状骨化	15 / 8	17 / 10	17 / 12	49 / 30
短小過剰肋骨	4 / 4	6 / 3	6 / 4	16 / 11
頸肋	0 / 0	1 / 1	0 / 0	1 / 1
胸椎体半椎体	0 / 0	1 / 1	0 / 0	1 / 1
波状肋骨	2 / 2	2 / 1	0 / 0	4 / 3
<b>変異合計</b>				
検査胎児数	259 / 20	263 / 20	245 / 20	767 / 60
異常胎児数 (異常胎児 %)	75 / 19 28.9%	101 / 20 38.4%	87 / 20 35.5%	263 / 59 33.4%

\*1 重複した項目もある。

## 雑誌

資料 番号	発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
1	木暮晋太郎、和田圭二、鈴木敬久	電圧形インバータを用いた20 kHz 磁界発生装置の開発	電気学会全国大会	1-160	pp.198-199	2009年
2	Shintaroh Kogure, Keiji Wada, Yukihisa Suzuki	Development of a Magnetic-Field Generator at 20 kHz using a Voltage-Source Inverter for Biological Research	European Conference on Power Electronics and Applications	abstract CD-ROM	pp.1-9	2009年
3	木暮晋太郎、和田圭二、鈴木敬久	電圧形インバータを用いた細胞ばく露評価用20 kHz 磁界発生装置の開発	電子情報通信学会技術研究報告	vol. 109, no. 350, EMCJ2009-88	pp. 19-24	2009年
4	木暮晋太郎、和田圭二、鈴木敬久	細胞ばく露評価用磁界発生装置の高出力化に向けた検討	電気学会研究会資料	電力技術研究会 2010(11)	pp.53-58	2010年
5	Keiji Wada, Shintaro Kogure, and Yukihisa Suzuki	Optimal Design of a Magnetic-Field Generator at 20 kHz for Biological Research	The 32rd Annual Meeting of BEMS	abstract CD-ROM	PA-127	2010年
6	鈴木伸也、和田圭二、鈴木敬久	平面コイル形状を用いた局所曝露用磁界発生装置の開発	平成 22年電気学会産業応用部門大会	2010	p. 33	2010年
7	Yuki Hirai, Yasuhisa Suzuki, Keiji Wada, Masao Taki	Dosimetry on the induced current density and the induced electric field in the pregnant rat model exposed to localized magnetic fields at 20 kHz	Asia-Pacific Radio Science Conference	abstract CD-ROM	K1-6	2010年
8	鈴木伸也、和田圭二、鈴木敬久	20 kHz 磁界発生用コイルの冷却方式の実験検討	2010年電気学会全国大会	1-149	p.171	2010年
9	鈴木伸也、和田圭二、鈴木敬久	局所ばく露を目的とした磁界発生コイル用電源装置	電気学会研究会資料	電磁環境研究会 2010(39)	pp. 7-12	2010年
10	平井佑樹、鈴木敬久、鈴木伸也、和氣加奈子、和田圭二	妊娠ラット用20 kHz 局所磁界ばく露装置の開発	電子情報通信学会総合大会講演論文集	2011年通信(1)	p.335	2011年

11	鈴木伸也、和田圭二、鈴木敬久	2重渦巻コイルを用いた動物用局所磁界曝露装置	2011年電気学会産業応用部門大会	1-118	pp.543-548	2011年
12	Yuki Hirai, Yasuhisa Suzuki, Keiji Wada, Kanako Wake, Masao Taki, Akira Ushiyama, Chiyoji Ohkubo	Development of the exposure apparatus with the localized magnetic field at 20kHz for pregnant rats	The 33rd Annual Meeting of BEMIS	abstract CD-ROM	09-3	2011年
13	Keiji Wada, Yukihisa Suzuki, Akira Ushiyama	Experimental verification of a localized magnetic field generator using a two-layered coil	The 33rd Annual Meeting of BEMIS	abstract CD-ROM	PA-113	2011年
14	平井佑樹、鈴木敬久、鈴木伸也、和氣加奈子、和田圭二、多氣昌生、牛山明、大久保千代次	妊娠ラット用ばく露装置の開発とドシメトリによる評価	電子情報通信学会技術研究報告	EMCJ, 環境電磁工学 111 (205)	pp. 1-6	2011年
15	平井佑樹、鈴木敬久、和氣加奈子、和田圭二、多氣昌生、牛山明、大久保千代次	妊娠ラット用20kHz 局所磁界ばく露装置における胎児の内臓誘導電界の不確定性の検討	2012年電子情報通信学会総合大会	2012年通信(1)	p.365	2012年
16	Kanako Wake, Tomoyuki Nojima, Soichi Watanabe, Osamu Hashimoto, Yukihisa Suzuki, Masao Taki, Chiyoji Ohkubo	Magnetic Fields in Intermediate Frequency Band generated by IH-hobs	The 34th annual meeting of bioelectromagnetics society	abstract CD-ROM	PA-91	2012年
17	池畑政輝、吉江幸子、早川敏雄	中間周波磁界の生物影響評価	第83回日本産業衛生学会	産衛誌、52巻	p521	2012年
18	Masateru Ikehata, Keiji Wada, Yukihisa Suzuki, Sachiko Yoshie, Taiji Sakai, Kanako Wake, Satoshi Nakasono, Masao Taki, Chiyoji Ohkubo	Development of exposure system of intermediate frequency magnetic fields for in vitro test systems	The 32rd Annual Meeting of BEMIS	abstract CD-ROM		2010年
19	Masateru Ikehata, Keiji Wada, Yukihisa Suzuki, Sachiko Yoshie, Taiji Sakai, Kanako Wake, Satoshi Nakasono, Masao Taki, Chiyoji Ohkubo	Evaluation of Genotoxic Effects of Intermediate Frequency Magnetic Field in in vitro Micronucleus Assay Using CHL/IU Cells	2010 Asia-Pacific Radio Science Conference	abstract CD-ROM	KP-2	2010年
20	Sachiko Yoshie, Masateru Ikehata, Yukihisa Suzuki, Keiji Wada, Chiyoji Okubo and Toshio Hayakawa	Evaluation of biological effects of intermediate frequency magnetic field based on growth of DNA repair deficient mammalian cells and mutation assay	2010 Asia-Pacific Radio Science Conference	abstract CD-ROM	K1-4	2010年

21	Masateru Ikehata, Sachiko Yoshie, Yuki Ogasawara, Kazuyuki Ishii, Keiji Wada, Yukihiisa Suzuki, Taiji Sakai, Kanako Wake, Satoshi Nakasono, Masao Taki and Chiyoji Ohkubo	Evaluation of biological effects by exposure to intermediate frequency magnetic fields	the 6th International Workshop of Biological Effects of Electromagnetic Fields	abstract CD-ROM		2010年
22	吉江幸子、池畑政輝、鈴木敬久、和田圭二、和氣加奈子、酒井泰二、中園聡、多氣昌生、大久保千代次	中間周波磁界の変異原性およびDNA修復系欠損細胞を用いた毒性の評価	第39回環境変異原学会	同要旨集	p.122	2010年
23	池畑政輝、吉江幸子、和田圭二、鈴木敬久、酒井泰二、和氣加奈子、中園聡、多氣昌生、大久保千代次	In vitro 小核試験による中間周波磁界の生物影響評価	第二回医用生体電磁気学シンポジウム	同要旨集	p16	2011年
24	吉江幸子、池畑政輝、鈴木敬久、和田圭二、和氣加奈子、酒井泰二、中園聡、多氣昌生、大久保千代次	哺乳類細胞を用いた中間周波磁界の変異原性評価	第84回産業衛生学会	産衛誌、53巻	p.338	2011年
25	M. Ikehata, S. Yoshie, T. Hayakawa, Y. Suzuki and M. Taki	EMFs in Railway system - Evaluation of Biological Effects and Current Trends of its Health Risk Assessment; WCCR2011	第9回世界鉄道研究会議	abstract CD-ROM		2011年
26	Masateru Ikehata, Sachiko Yoshie, Keiji Wada, Yukihiisa Suzuki, Taiji Sakai, Kanako Wake, Satoshi Nakasono, Masao Taki and Chiyoji Ohkubo	Biological effects of intermediate frequency magnetic fields -Development of exposure system and evaluate genotoxicity in vitro-	The XXX General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science	abstract CD-ROM		2011年
27	Sachiko Yoshie, Yukihiisa Suzuki, Keiji Wada, Kanako Wake, Taiji Sakai, Satoshi Nakasono, Masao Taki, Chiyoji Ohkubo and Masateru Ikehata	Estimation of Mutagenic Effects of Intermediate Frequency Magnetic Field using mammalian cells	The XXX General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science	abstract CD-ROM		2011年
28	Yuki Ogasawara, Masateru Ikehata, Ryo Sakaguchi, Shiho Awakura, Sachiko Yoshie, Chiyoji Ohkubo and Kazuyuki Ishii	Effects of exposure to intermediate frequency magnetic fields on gene expression of estrogen-regulated gene in MCF-7 cells	The XXX General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science	abstract CD-ROM		2011年

29	M. Ikehata	Evaluation of Biological Effects of Magnetic Fields from static to intermediate frequency ISAP2011	Jeju (2011年アンテナ・伝播国際シンポジウム)	abstract CD-ROM		2011年
30	小笠原 裕樹、坂口 涼、粟倉 志歩、石井 一行、池畑 政輝*、吉江 幸子、大久保千代次	エストロゲン応答性レポーター遺伝子アッセイを用いた中間周波磁界の生物影響評価	ゲネティックス研究会	MAG-11-080	○	2011年
31	Yuki Ogasawara, Masateru Ikehata, Sachiko Yoshie, Satoshi Nakasono, Chiyoji Ohkubo, Kazuyuki Ishii	Effects of exposure to 21kHz magnetic fields on estrogen-regulated gene expression in MCF-7 cells	34th Annual Meeting of Bioelectromagnetics Society	abstract book	pp.95-96	2012年
32	吉江幸子、池畑政輝、小笠原裕樹、石井一行、大久保千代次	中間周波磁界が細胞分化に与える影響の評価	日本放射線影響学会第55回大会	同要旨集	p.165	2012年
33	池畑政輝	中間周波磁界の生物影響の評価	第262回鉄道総研月例発表会			2012年
34	M. Ikehata.	EMF issue in Railway systems Evaluation of Biological Effects and Trends of Regulation in Japan.	ISEF'2013			2013年
35	M. Ikehata, S. Yoshie, T. Hayakawa, Y. Suzuki and M. Taki.	EMF issue in Railway systems - Evaluation of Biological Effects and Trends of Regulation in Japan.	WCRR2013			2013年
36	Sachiko Yoshie, Masateru Ikehata, Yuuki Ogasawara, Kazuyuki Ishii, Yukihisa Suzuki, Keiji Wada, Kanako Wake, Satoshi Nakasono, Masao Taki and Chiyoji Ohkubo.	Evaluation of Health effect of intermediate frequency magnetic field.	WCRR2013			2013年
37	Ohtani S, Ushiyama A, Unno A, Hirai Y, Suzuki Y, Wada K, Kunugita N, Ohkubo C	Development of novel in vivo exposure apparatus for intermediate frequency magnetic field.	The 10th International Congress of the European Bioelectromagnetic Association (EBEA) (Available online at <a href="http://proceedings.ebea2011.org/modules/request7a64.html?module=oc_program&amp;action=summary.php&amp;id=5211">http://proceedings.ebea2011.org/modules/request7a64.html?module=oc_program&amp;action=summary.php&amp;id=5211</a> )		On Line	2011年

38	大谷真, 牛山明, 海野愛子, 平井佑樹, 鈴木敬久, 和田圭二, 樺田尚樹, 大久保千代次	齧歯類を用いたin vivo中間周波磁界ばく露のための新規ばく露装置の開発	生体医工学会誌(第50回日本生体医工学会大会プログラム集) 及び付属CD-ROM	Vol49.Supp.1	p.284	2011年
39	牛山明, 海野愛子, 大谷真, 鈴木敬久, 和田圭二, 樺田尚樹, 大久保千代次	ラットにおける中間周波磁界の全身曝露影響に関する研究	生体医工学会誌(第50回日本生体医工学会大会プログラム集) 及び付属CD-ROM	Vol49.Supp.1	p.347	2011年
40	Ushiyama A, Unno A, Ohtani S, Suzuki Y, Wada K, Kunugita N, Ohkubo C	The effects of 21 kHz intermediate frequency magnetic fields on blood properties and immune systems in rats	The 33rd Annual Meeting of Bioelectromagnetics Society	abstract	CD-ROM	2011年
41	Ushiyama A, Unno A, Ohtani S, Suzuki Y, Wada K, Kunugita N, Ohkubo C	Short-term whole body exposure of intermediate frequency magnetic fields to rats does not affect blood properties and immune systems	The XXX General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (Available on-line at <a href="http://www.ursi.org/proceedings/procGA11/ursi/KP1-7.pdf">http://www.ursi.org/proceedings/procGA11/ursi/KP1-7.pdf</a> )		KP1.7	2011年
42	牛山明, 大谷真, 海野愛子, 樺田尚樹	中間周波電磁界の生体影響評価	第48回全国衛生化学技術協議会年会	同講演集	p.258-259	2011年
43	牛山明, 大谷真, 樺田尚樹, 鈴木敬久, 和田圭二, 大久保千代次	中間周波電磁界の生体影響に関する研究	電気学会マグネティックス研究会	MAG-11	p.39-43	2011年
44	牛山明, 大谷真, 鈴木敬久, 和田圭二, 樺田尚樹, 大久保千代次	中間周波磁界の全身亜慢性ばく露影響に関する研究	生体医工学会誌(第51回日本生体医工学会大会プログラム集)	Vol.50, Suppl.1	p.241	2011年
45	Ushiyama A, Ohtani S, Suzuki Y, Wada K, Kunugita N, Ohkubo C.	The effects of 21 kHz intermediate frequency magnetic fields on blood properties and immune systems in juvenile rats	The 2012 Korea-Japan EMT/EMC/BE Joint Conference (KJJC-2012)	the Conference Proceedings	p.251-253	2012年
46	Ushiyama A, Ohtani S, Maeda M, Hirai Y, Suzuki Y, Wada K, Kunugita N, Ohkubo C	Effects of abdominal local exposure of intermediate frequency (21kHz) magnetic fields on fetal development in rats	The 34th Annual Meeting of Bioelectromagnetics Society	Abstract book	p.209	2012年

47	牛山明	中間周波数磁界の催奇形性に関する研究およびBEMS2012報告（特別講演）	平成24年度第一回医用生体電磁気学研究会（兼第22期第一回URSI-K国内小委員会）	講演資料集		2012年
48	牛山明	生活環境中の電磁界：測定・規制・健康影響（公衆衛生行政研修フォーラムシンポジスト）	日本公衆衛生学雑誌（第71回日本公衆衛生学会総会抄録集）	Vol. 59 (1)	p104	2012年
49	牛山明, 大谷真, 前田満智子, 櫻田尚樹, 鈴木敬久, 和田圭二, 大久保千代次	家庭用IH調理器で利用される21kHzの中間周波磁界の生体ばく露による発生毒性評価	第49回全国衛生化学技術協議会年会	同講演集	p266-267	2012年
50	Ushiyama A, Ohtani S, Maeda M, Suzuki Y, Wada K, Kunugita N, Ohkubo C.	Lack of teratological effects in pregnant rats being locally exposed to their abdomen of intermediate frequency (21kHz) magnetic fields.	BioEM2013			2013年 (6月)
51	Ushiyama A, Ohtani S, Suzuki Y, Wada K, Kunugita N, Ohkubo C.	The 21 kHz Intermediate frequency magnetic fields do not affect on Blood Properties and Immune Systems in Juvenile Rats	2013 CIGRE 3rd International Colloquium on Low Frequency Electromagnetic Fields (EMF-ELF 2013)			2013年 (10月)

# 電圧形インバータを用いた 20 kHz 磁界発生装置の開発

木暮 晋太郎, 和田 圭二, 鈴木 敬久 (首都大学東京)

Development of a Magnetic Field Generator at 20 kHz using a Voltage Source Inverter for a Biomedical Research

Shintaro Kogure, Keiji Wada, Yukihiisa Suzuki(Tokyo Metropolitan University)

## 1. はじめに

近年, 国内では誘導加熱 (IH) 調理器の普及が一般家庭, 業務用問わず急速に進んで来ている。このような現状から, IH 調理器等で使用される中間周波電磁界の生体影響に関する関心が高まっている。

生体影響を調査・研究するためには細胞や動物を対象とした実験が行われるため, 広範囲かつ高磁界を発生させることが可能な電源およびコイルが必須である。さらに, 長時間動作 (数時間から数日間) の連続動作が要求されるため, 電源・コイルにおいても同様に長時間の安定動作が必要である。従来, 調査・研究用磁界発生装置の電源には線形増幅回路などの正弦波交流電圧を用いる電源が使用されていた。しかし, その出力範囲には限界があるため高磁界を発生することは困難である。

これまでに, 磁界発生コイルの研究<sup>(1)</sup> は盛んに行われてきた。しかし, 電源部までを含めた磁界発生装置全体の設計法を示した文献は著者らの知る限りないように思われる。本稿では, 図 1 に示す電圧形インバータを用いた生体影響の調査・研究のための試験用磁界発生装置の設計・製作を行い, 解析と実験によりその有用性を明らかにする。さらに, 磁束密度 8.3 mT を発生可能であることを示し, 3 台のコイルを用いて広範囲の磁界発生についても検討する。

## 2. 装置構成

本論文で検討する磁界曝露装置の回路構成は, 図 1 に示すようにフルブリッジインバータと LC 直列共振回路から構成されている。ここで,  $L$  は磁界発生用コイル,  $C$  は共振用コンデンサである。空芯円柱状の磁界発生用コイル  $L$  に 20 kHz の正弦波電流を流し, コイル内に空間的に均一な磁界を発生させる。空芯コイル内部に発生する磁界は電流  $i_L$  によって決まる。本インバータは, ス

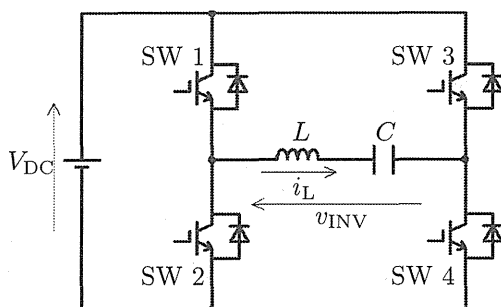


図 1 回路構成

Fig. 1. Experiment circuit

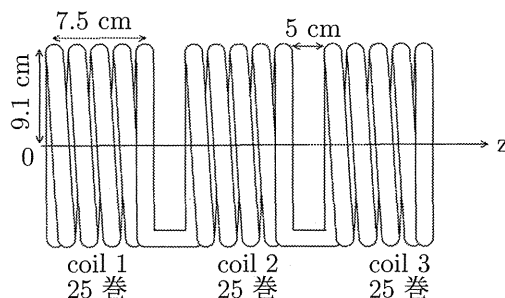


図 2 コイル B の磁界設計パラメータ

Fig. 2. Parameters of the coil B

イッチング素子 SW 1, SW 4 と SW 2, SW 3 を交互に 20 kHz でオン・オフすることで矩形波電圧  $v_{INV}$  を出力させ, 正弦波電流  $i_L$  を生成している。ただし, インバータのデューティ比は一定 (50%) であるため直流電源の出力電圧  $V_{DC}$  の振幅を調整することにより  $i_L$  を可変させている。試作したインバータは, パワーデバイスに IGBT を用いており, 直流定格電圧 280 V, 出力電流 25 A である。また共振周波数をスイッチング周波数である 20 kHz 付近に設定している。

本稿では, 磁界発生用コイルとして高磁界を出力することに特化したコイル A と発生磁界の均一領域を拡大することを目的としたコイル B の 2 種類について実験・検討を行う。コイル A は, 半径 9.6 cm, 長さ 8 cm, 75 巻の空芯コイル 1 台での磁界発生を行う。コイル長に対する巻線を高密度化することで, 高磁界を発生できる。自己インダクタンスは 1.1 mH, 直流抵抗は 314 mΩ である。コイル B は, 半径 9.1 cm, 長さ 7.5 cm, 25 巻のコイル 3 台を直列に接続し駆動する。図 2 にコイル B の概略図を示す。ここでは, コイルの配置間隔を 5 cm とした。このときのコイル全体の相互インダクタンスを含めたインダクタンスは 475.2 μH となる。なお, コイル中心軸を z 軸とし, coil 1 の始端を 0 とし, coil 3 の終端までの長さが 32.5 cm となる。

各コイルに対する共振用コンデンサには, フィルムコンデンサを使用した。共振用コンデンサの容量は, それぞれ実測値で 57.2 nF, 136.1 nF であり, 共振周波数は 19.9 kHz, 19.8 kHz となった。

なお, コイル, 共振用コンデンサの設計法及び構成の詳細は文献 (2) を参考にしている。

## 3. 実験結果

ここでは, インバータを用いた磁界発生装置の設計法の有効性を示す。図 3 にコイル A が発生させた中心軸上



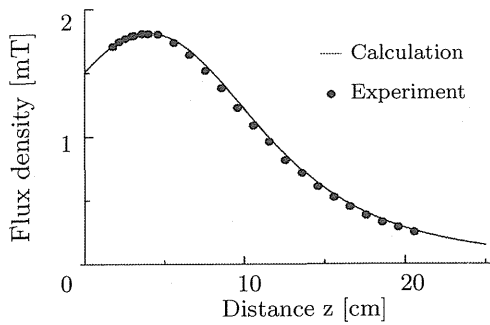


図3 z方向の距離と磁束密度分布 (Coil System A)

Fig. 3. Relationship between the distance of z-axis and magnetic field

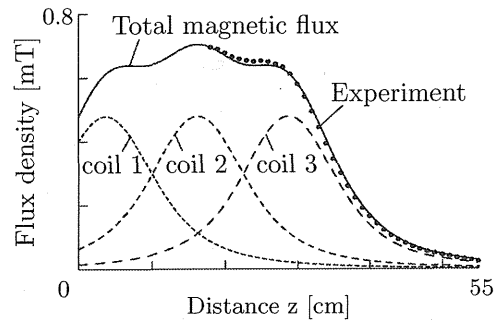


図5 z方向の距離と磁束密度分布 (coil B)

Fig. 5. Relationship between the distance of z-axis and magnetic field using the coil B

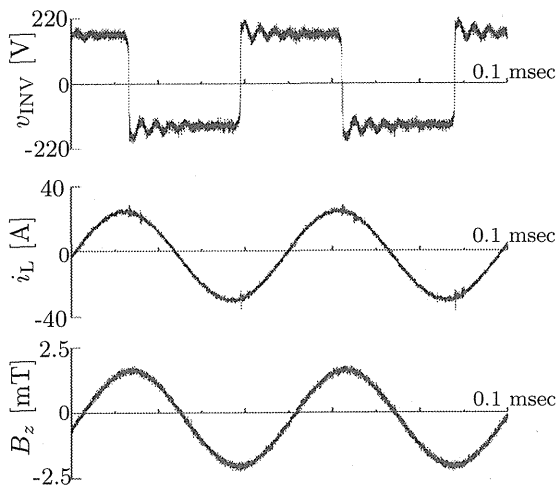


図4 8.3 mT 発生時の実験波形 (coil A)

Fig. 4. Experimental waveforms when the coil A generates 8.3 mT

の磁束密度の分布を示す。ここで、実線は解析結果、●は実験結果である。これらと比較すると、磁束密度の強度は設計通りの空間分布になっていることがわかる。磁界は電流値  $i_L$  によって決定されるため、 $i_L$  の値を測定すれば図3の結果を利用して発生磁束密度分布を推定できる。

図4は、コイル A により磁束密度 8.3 mT を発生させたときの実験波形である。インバータの出力電圧  $v_{INV}$ 、コイルに流れる電流  $i_L$ 、z 軸方向の発生磁束密度  $B_z$  を示している。正弦波状の交流磁界が発生できていることがわかる。なお、本研究で使用している磁界測定器 (HIOKI 3470) は、DC~400 kHz までの磁束密度を 2 mT まで測定できる。そこで、2 mT 以上の磁束密度測定においてはコイル中心軸上においてコイルから 20 cm 離れた地点で測定している。コイル電流  $i_L$  と  $z=20$  cm の地点において実効値で 1.3 mT 発生していることから、コイル中心の磁束密度が 8.3 mT であると推定できる。

図5は3台のコイルを直列に接続したコイル B を用いた場合の実験結果である。破線がそれぞれ coil 1~3 の発生する磁界を示し、実線がその合成磁束密度の分布、●

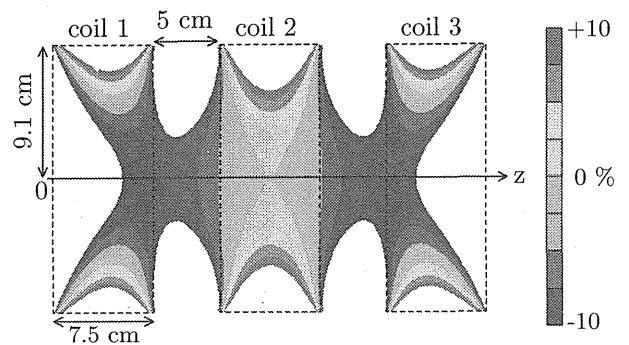


図6 誤差 ±10% の磁束密度分布領域

Fig. 6. Uniform magnetic field area of ±10% in error margin

が実験値を示している。コイル B でも磁界設計通りに分布していることが確認できる。さらに、図6にコイル B 内の磁界分布図を示す。coil 2 の中心の磁束密度値に対して偏差 ±10% 以内の領域を示している。各コイルを破線で示している。coil 2 を中心として均一な磁界領域が分布していることがわかる。つまり、coil 1 と coil 3 は coil 2 に対して補助的な役割をもつと考えられる。コイル数を3つにすることで、発生磁束密度の空間的な均一度が増加できることが確認できる。

#### 4. まとめ

本稿では、単相フルブリッジインバータを用いた 20 kHz 磁界発生装置の設計法を示し、その有用性を実験と解析により示した。さらに、コイル 3 台を用いた場合における発生磁界の空間的な均一領域を示した。

#### 文献

- (1) J.L.Kirschvink: "Uniform Magnetic Fields and Double-Wrapped Coil Systems: Improved Techniques for the Design of Bioelectromagnetic Experiments", Bioelectromagnetics 13:401-411 (1992)
- (2) 木暮 晋太郎, 和田 圭二, 鈴木 敬久: "20 kHz 高磁界発生装置の開発", 電気学会研究会資料, SPC-08-167, pp. 37-42 (2008)

# Development of a Magnetic-Field Generator at 20 kHz using a Voltage-Source Inverter for Biological Research

Shintaro Kogure, Keiji Wada, Yukihiisa Suzuki  
Department of Electrical Engineering  
Tokyo Metropolitan University  
1-1, Minami-osawa, Hachioji,  
Tokyo 192-0397, JAPAN  
Phone: +81 (426) 77-1111  
Fax: +81 (426) 77-2756  
Email: kj-wada@tmu.ac.jp

## Keywords

<<Induction heating>>, <<Voltage Source Inverters (VSI)>>, <<EMI>>

## Abstract

This paper presents an alternating magnetic-field generator at 20 kHz for biological research using a single phase inverter and a series LC resonant circuit. Both single coil and multiple coil magnetic-field generators are designed and their effectiveness is confirmed by analytical and experimental results. These results demonstrate that the magnetic-field generator can produce 8 mT at a frequency of 20 kHz at the midpoint of the single-coil with low distortion of magnetic flux waveform. Additionally, the multiple-coil magnetic-field generator produces the distribution of uniform magnetic flux over a larger volume than the single-coil magnetic-field generator.

## Introduction

Recently, induction-heating (IH) cooking apparatus (hobs) have come to be widely used in homes and restaurants in Japan. The IH cooking apparatus (hobs) have diffusion rates of over 10%, and it is thought that this value will increase in the future because the IH cooking apparatus (hobs) have several advantages over conventional gas and electric cookers. An alternating magnetic field with frequency range 20 kHz to 100 kHz is used the fundamental heating frequency for the IH cooking apparatus (hobs). The alternating magnetic field induces eddy currents in metal pots and pans and these eddy currents generate heat due to the electrical resistance of the metal. Many technical papers have been presented on IH cooking apparatus (hobs) for home appliances [1] and industrial applications [2], and they consider how the efficiency of

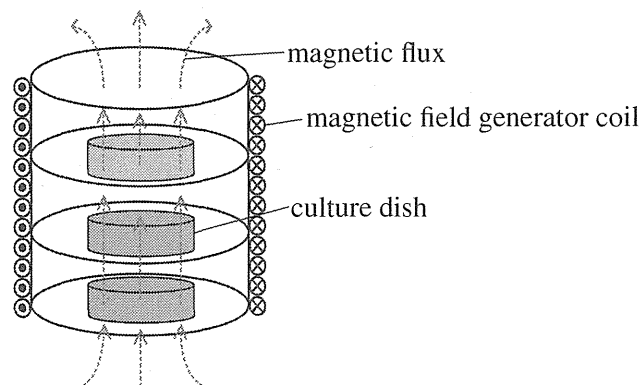


Figure 1: Prototype of the magnetic field generator

the inverter circuit can be improved. In particular, the circuit topology or the control methods of the inverter circuit has been discussed in detail.

Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields have been produced by the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) [3]. These guidelines specify that exposure to fields should be less than  $6.25 \mu\text{T}$  with frequency range 300 Hz to 10 MHz in the proximity of an IH cooking apparatus (hobs). Moreover, the Environmental Health Criteria 238 of the World Health Organization (WHO) recommends that research be conducted into the possible health effects of exposure to electromagnetic fields [4].

Biological research undertaken by a university and a research center has evaluated the leakage flux from an IH cooking apparatus (hobs) [5] ~ [10]. A magnetic-field generator, which generates alternative magnetic fields with frequency range 20 kHz to 100 kHz, is used for biological research. Fig. 1 shows a prototype of the magnetic-field generator designed for biological research. The coil structure is a solenoid and does not contain any magnetic materials, and cells in culture dishes are inserted inside the solenoid coil. Based on this design, the solenoid coil is required to generate the uniform magnetic field over a wide area. A conventional magnetic-field generator can produce less than 1 mT at 20 kHz, and consequently a linear amplifier is used to amplify the field [11]. However, the linear amplifiers have low efficiencies and are bulky and costly.

This paper proposes an alternating magnetic-field generator at 20 kHz for biological research using a voltage source inverter and a series LC resonant circuit. This paper describes the design procedure of an alternating magnetic-field generator. The generated magnetic field and inductance of the coil are calculated by complete elliptic integrals given in [12] ~ [14]. Moreover, this paper proposes a multiple coil structure for generating the more uniform magnetic field. In this case, it is necessary to calculate the mutual inductance between the coils. The total inductance of the coil (that is the sum of the self inductance and the mutual inductance) is calculated by [15].

The validity of the coil design is confirmed by the experimental results. These results show that the magnetic-field generator produces 8 mT at 20 kHz, and its magnetic flux waveform has low distortion. Finally, it is found that the distribution of the uniform magnetic flux volume of the multiple-coil generator is 2.2 times larger than that of the single-coil generator.

## System Configuration

### Circuit Configuration

Fig. 2 shows the circuit configuration of a magnetic-field generator that consists of an voltage source inverter and a series LC resonant circuit. The inverter rated at 280 V and 25 A is used as a single-phase full-bridge inverter with four IGBTs. The duty ratio of the inverter was set to 50%, so that  $i_L$  was controlled by the DC voltage  $V_{DC}$ . Table I shows the circuit parameters of the inverter. The generator produces alternating magnetic field with uniform distribution at 20 kHz inside the solenoid coil. The strength of magnetic field depends on the current  $i_L$  and the number of the coil. Here,  $L_r$  is the inductance of the magnetic field generating (air core) coil and  $C_r$  is the capacitance of the resonant capacitor.  $R$  is the resistance of the wire.

### Magnetic-Field Generator Coil

The magnetic flux distribution in the magnetic-field generator coil is calculated for the following coil design. Fig. 3 shows the parameters of the magnetic-field generator coil in a cylindrical coordinate system, where  $a$  represents the coil radius,  $\ell$  is the coil length, and  $r$  is the radial distance from the central

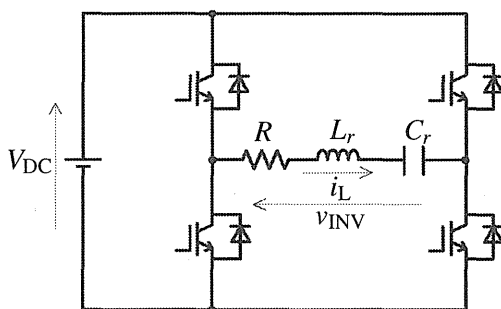


Figure 2: Experiment circuit

Table I: Circuit parameter of the inverter circuit

Rated input voltage	DC280 V
Output frequency	18 kHz ~ 22 kHz
Rated output current	25 A
Dead time	3.5 $\mu$ sec
Output waveform	Square (50 % Duty)

axis. The  $z$  axis corresponds to the central axis of the coil. The theoretical magnetic flux distribution in the cylindrical coordinate system [12], [13] is given by

$$H_z(a, r, z) = \frac{I}{2\pi\sqrt{(a+r)^2+z^2}} \left\{ K(a, r, z) + \frac{a^2-r^2-z^2}{(a-r)^2+z^2} E(a, r, z) \right\} \quad (1)$$

$$H_r(a, r, z) = \frac{zI}{2\pi r\sqrt{(a+r)^2+z^2}} \left\{ -K(a, r, z) + \frac{a^2+r^2+z^2}{(a-r)^2+z^2} E(a, r, z) \right\} \quad (2)$$

$$|H| = \sqrt{H_z^2 + H_r^2} \quad (3)$$

$$K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \theta}} d\theta \quad (4)$$

$$E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1-k^2 \sin^2 \theta} d\theta \quad (5)$$

$$k^2 = \frac{4ar}{(a+r)^2+z^2}. \quad (6)$$

The magnetic flux  $B$  is defined by

$$B = \mu_0 H, \quad (7)$$

where  $\mu_0 (= 4\pi \times 10^{-7})$  is the permeability in a vacuum.  $H_z$  and  $H_r$  are the  $z$  direction and  $r$  direction components of the magnetic field generated by a single-turn coil.  $K(k)$  and  $E(k)$  are complete elliptic integrals of the first and second kinds, respectively.

Fig. 5 shows the magnetic flux distribution along the  $z$ -axis generated by the single circular coil that is 9.6 cm in radius, 8.0 cm in length, and has 75 turns as shown in Fig. 4. The single-coil is composed of three-layer structure, 25 turns per layer. The coil wire used the litz wire of 2.8 mm in the diameter, 2.4  $\text{mm}^2$  in cross-sectional area. A biological cell is cultured in a culture dish for biological assessments.

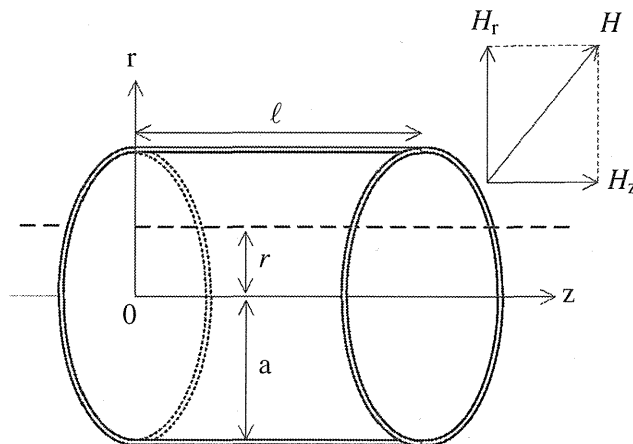


Figure 3: Cylindrical coordinate system of an air core coil