

g 値							
No.							
0kGy	M1	M2	g1	g2	g3	g4	g5
1	2.0329	1.9807	2.0065				
2	2.0329	1.981	2.0063				
3	2.0329	1.981	2.0068				
4	2.0329	1.981	2.0064				
5	2.0329	1.9805	2.0064				
0.05 k Gy							
1	2.0329	1.981	2.0065	2.0032	2.0021	2.0001	1.9973
2	2.0329	1.981	2.0067	2.0033	2.0022	2.0002	1.9974
3	2.0329	1.981	2.0066	2.0032	2.0021	2.0001	1.9972
4	2.0329	1.981	2.0067	2.0034	2.0022	2.0002	1.9973
5	2.0329	1.981	2.0064	2.0032	2.0022	2.0001	1.9973
0.1 k Gy							
1	2.0329	1.981	2.0064	2.0032	2.0022	2.0001	1.9973
2	2.0329	1.981	2.0067	2.0033	2.0022	2.0001	1.9973
3	2.0329	1.981	2.0066	2.0032	2.0022	2.0002	1.9973
4	2.0329	1.981	2.0065	2.0032	2.0022	2.0001	1.9973
5	2.0329	1.981	2.0066	2.0033	2.0021	2.0003	1.9972
1 k Gy							
1	2.0329	1.981	2.059	2.0033	2.0022	2.0002	1.9973
2	2.0329	1.981	2.0062	2.0032	2.0022	2.0001	1.9973
3	2.0329	1.981	2.0059	2.0031	2.0022	2.0002	1.9972
4	2.0329	1.981	2.0064	2.0032	2.0022	2.0002	1.9973
5	2.033	1.981	2.0059	2.0032	2.0023	2.0001	1.9972
3 k Gy							
1	2.0329	1.981	2.0061	2.0032	2.0022	2.0002	1.9973
2	2.033	1.981	2.0059	2.0031	2.0021	2.0001	1.9973
3	2.0329	1.981	2.0066	2.0032	2.0022	2.0001	1.9973
4	2.0329	1.981	2.006	2.0032	2.0022	2.0002	1.9974
5	2.03294	1.981	2.0059	2.0032	2.0022	2.0003	1.9974
5 k Gy							
1	2.0329	1.981	2.0059	2.0032	2.0022	2.0002	1.9973
2	2.0329	1.981	2.006	2.0032	2.0022	2.0002	1.9973
3	2.0329	1.981	2.006	2.0032	2.0022	2.0002	1.9973
4	2.033	1.981	2.0059	2.0032	2.0022	2.0002	1.9973
5	2.0329	1.981	2.0059	2.0031	2.0022	2.0002	1.9972
平均	2.0329	1.981	2.0063	2.0032	2.0022	2.0002	1.9973
SD	0.00003	0.0001	0.00003	0.00004	0.00004	0.00006	0.00006

図10-16 ハマグリ（貝殻）のESRスペクトルから求められた指定した位置のg値

$g_1=2.006 \pm 0.001$, $g_2=2.003 \pm 0.001$, g_3 $g_2-g_5=1.01 \pm 0.01$ mT
 $= 2.002 \pm 0.001$, $g_4=2.000 \pm 0.001$, と、設定する。
 $g_5=1.997 \pm 0.001$

さらに、実用的なシグナルの幅（間隔）は、

$M_1-M_2= 8.68 \pm 0.01$ mT,
 $g_2-g_3 = 0.18 \pm 0.01$ mT,
 $g_2-g_4 = 0.51 \pm 0.01$ mT,
 $g_3-g_4= 0.50 \pm 0.01$ mT

0.05kGyのシグナル強度とノイズレベルを比較すると、

$S/N = 1226 / 70 = 17.51$
 である。

マンガンマーカースとの比較は、
 $S/M = 1226.0 / 428 = 2.86$

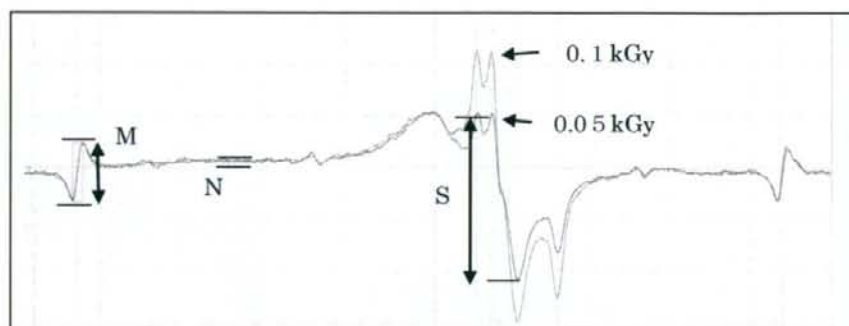


図10-17 低線量照射したハマグリ（貝殻）のESRスペクトル

である。

この値より、0.05 k Gy 照射のS/Mは、
 $1226/428 = 2.86$ であり、この値から0.001 k Gy
 を推定すると、

S/M 値は $2.86 / 50 = 0.057$

実際のシグナル強度は、マンガンマーカースの強度
 が同じであると想定して逆算すると、24.4である。
 この値は、ノイズの高さの約半分以下なのシ

グナルと認識できない。

そこで、図10-17から確認できるように、
 非照射で確認できるシグナルが低線量照射のハマ
 グリではほとんど一致する。このことを利用して、
 放射線照射で生成したラジカルのシグナルを0.
 1 k Gy と 0 k Gy のシグナルから作成した。（図
 10-18）0.1 k Gy の照射によって生じたシ
 グナルの高さを100分の1（0.001 k Gy と

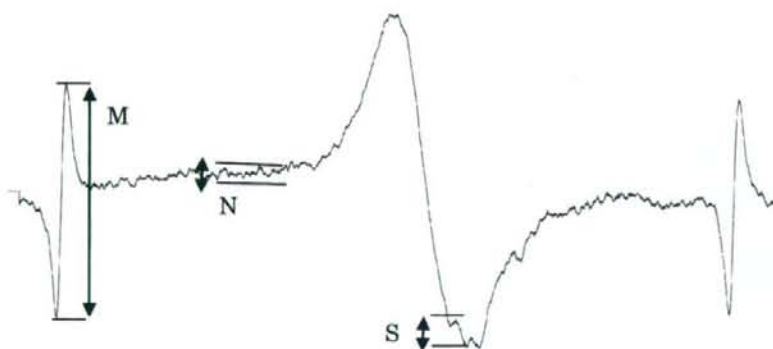


図7-18 合成による0.001 kGy (1Gy) のESRスペクトル



図10-19 合成による0.005 kGy (5Gy) のESRスペクトル

する)に修正・加工し、0 kGyのシグナルと合成(和)した。ここで、任意の幅でノイズ部分の高さ(n)と0 kGyのシグナルに重なった0.001 kGyのシグナルの高さ(s)をもとめ、S/N比を求めた。

$$S/N = 66.88 / 44.688 = 1.50$$

マンガンマーカのシグナル強度(M)と“S”の比は、

$$S/M = 66.88 / 477.571 = 0.140$$

S/Nの値が“3”以上の値ではないので、この場合、シグナルと見なすのは難しい。また、0.05 kGy照射の実験値から0.001 kGyのS/M値は0.057であるので、ここでも、シグナルと判断するのは難しいと考える。また、シグナルと見なすS/Nの値を“5”と設定するならば、0.003kGyはシグナルと見なすことができる可能性がある。

1.1. トリ(骨付きもも肉)

1.1.1 トリ(足)の骨の条件設定

(1) ESRの測定条件

キャビティの内標準物質であるマンガンマーカの6本のシグナルのうち、3番目と4番目の間に照射後のシグナルが検出できることから、これらのESRシグナルが現在の装置で問題なく測定可能である条件を設定した。なお、照射強度によりシグナル変化から、シグナル強度は照射量に依存し、また、複数のシグナルが重なっていると判断されたため、5 kGyの照射した試料のシグナルをもとに磁場変調においては、スペクトル全体がゆがまず、かつ、最大信号強度付近になる値を設定した。

この値は磁場変調周波数100 kHz / 0.2 mTである。また、マイクロ波出力においては、信号強度と平方根(出力値)の関係が直線になる値を求めた。その結果、2 mWと決定した。

試料量は、各照射によって個体差が生じたデータとなるため、試料の高さ(長さ)を20.4 ~ 22.5 mmに調整、その結果、試料重量は220 ~ 249 mgとなった。高さおよび重量は共にCV(%)が約5%となった。ここでの目的がESRの測定条件であるため、照射試料のラジカル量に与える影響は微小と考え補正は行わなかった。

トリの足の骨のESR条件(例)

Microwave: 9426.378 MHz / 2mW	*
Field: 335.862 ± 5mT	*
modulation: 100kHz / 0.2 mT	
TC: 0.1sec, Sweep Time: 2min	*
AMP: × 100	*
マーカの値: 600 ~ 800	*

*マイクロ波周波数は、サンプルの試料の大きさ・形状(曲がり・直線性など)によって、また、若干の水分含量などによって共鳴周波数の値は変動する。

*共鳴磁場は、上記の共鳴周波数によって決定するため(操作上の優先順位のため)、マンガンマーカを含めた全体のシグナルが低磁場側あるいは高磁場側へ若干ずれることがある。この場合は、左右のマンガンマーカのシグナルが10 mTの磁場掃引幅に入るように設定する。

* 時定数(Time Constant: TC)と掃引時間は、磁場掃引幅とS/N比の関係から、最適値があるためこの値とした

*AMP(拡大・縮小)においては、今回使用した日本電子製のESR装置(FAシリーズではダイナミックレンジが広く取られている)がデジタル信号処理され、スペクトル表示される。よって、

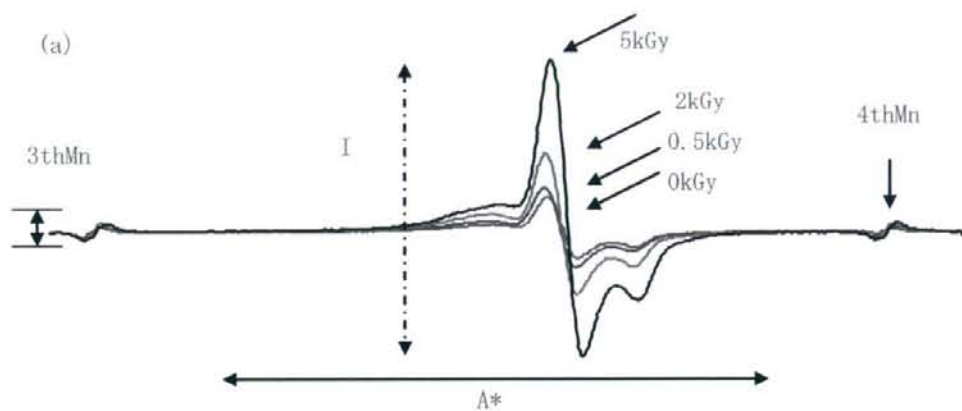


図11-1 照射量依存性を示すトリの骨のESRスペクトル
(a) 照射量依存的なスペクトル

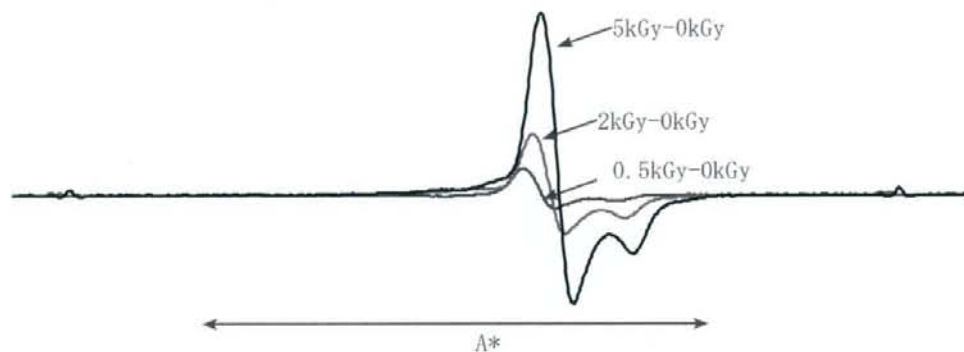


図11-1 照射量依存性を示すトリの骨のESRスペクトル
(b) 0kGyを元に各照射量の試料のスペクトルより差スペクトルを求めた結果。

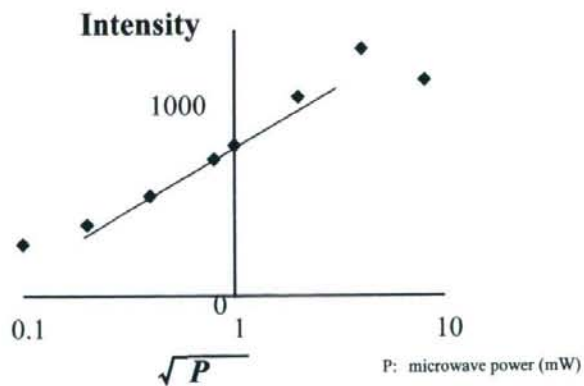


図11-2 トリの足(照射量5kGy)のシグナル強度とマイクロ波出力値の関係

標準表示で提供される幅の中でこの値を決定した。

(2) ESR測定条件 2

マンガンマーカのキャピティへの挿入値は、試料の0.5 kGy照射したものを参考にして、決定した。ただし、ロットによってマンガンマーカは、同一条件下において線幅および信号強度にばらつきが生じる可能性がある。600～800の値とした。

(3) トリの足の骨の試料管に詰める量の検討

市販されているESR試料管の長さは30 cmほどあり、取り扱いが面倒である。また、試料作成においても、測定に十分な量が確保できれば前処理も簡易になると考えられる。そこで、ESRの測定部およびラジカルの検出方法を考慮して、試料管に充填するトリの骨のチップの長さ重量を測定した。すでに、アラニンペレットの検討した結果を考慮し、結果は以下のテーブルに示すとおり、試料は0～5 kGyを照射したものを

No.	重量 (mg)	厚み (mm)	幅 (mm)	長さ (mm)
1	106	2.8	3.3	17
2	128	2.95	3.8	17
3	127	1.75	3.6	16.4
4	137	1.6	3.5	16.2
平均値	124.5	2.28	3.6	16.7
標準偏差	13.13	0.7	0.21	4.12
CV (%)	10.54	30.7	5.86	2.47

図11-3 トリの骨のチップのサイズと重量のばらつき

図11-3にまとめた。骨の場合、骨のチップの作成から実験がスタートしているが、上記の図で示すように、チップの重量および厚みをそろえることは困難である。また、幅はESR試料管の太さで決まるため、これらチップのサイズのばらつきは作成時の段階ですでに試料管に大きさにそろえているため、このようなばらつきの少ない数字となった。今回、長さを16～17 mmでそろえることにより、図11-1で示されるような照射量依存的なプロットが作成できたことを考え、さらに、マイクロ波の磁界の分布が大きく影響を与えていることから、測定部における充填率約20～40 mmの範囲で測定を行うことにした。各試料の大きさはそろえる必要がある。

2 ESRスペクトルの同定

差スペクトルの算出したスペクトルは図11-1である。このスペクトルがずれているのは、元のスペクトルの共鳴周波数・磁場がずれているため、一見、 g 値がずれているように見えるが、同じ値を示した。よって、スペクトルのパターンおよび g 値より差スペクトルで観測される放射線照射量依存性のあるスペクトルはハイドロキシアパタイトが骨の組織に含有された状態で観測された物と判断した。照射していない骨と照射した骨の差スペクトルをとり、 g 値の計算を行った。その結果、低磁場側の照射していない骨においても確認されるシグナルの g 値は2.004、差スペクトルから得られた g 値は、2.0016および1.9986であった。このことから、非照射においてあるいは照射後にも確認される低磁場側のシグ

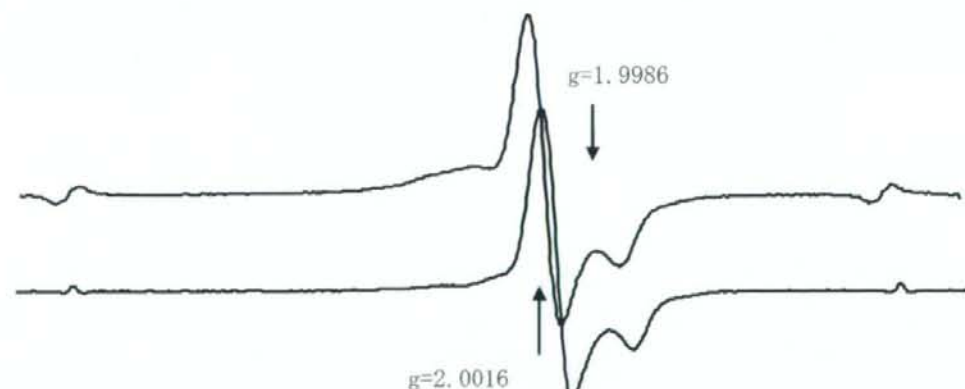


図11-4 トリの骨のオリジナルと差スペクトル

ナルは、カーボンあるいは有機ラジカルと推定され、一方、照射量に依存してシグナル強度が大きくなる物は、骨の構成成分であるヒドロキシアパタイトが骨組織に内包されてラジカル化されているものと判断した。

g 値の算出には、マンガンマーカの g 値とそのマーカ信号の間隔から、試料スペクトルに記した矢印の g 値を算出した。これには日本電子製の FA シリーズの機能である周波数によるマンガンマーカの g 値補正プログラム (標準装備) で行った。

1.1.3 トリの骨の ESR シグナル照射量依存性の確認

コバルト 60 による照射量は、0.05・0.1・1・3・5 kGy である。0 kGy は本研究室で保管した物を用いた。各照射量に対して個体数 5 個以上、照射後、凍結保存し、解凍後、グライ

照射量 (kGy)						
NO	0	0.05	0.1	1	3	5
1	133	179	102	100	143	114
2	164	198	167	141	125	213
3	200	103	115	224	175	137
4	158	170	197	99	74	131
5	133	112	196	134	130	179
平均値 (mg)	131	130.1	116.2	113	104	120

図 1.1-5 トリ骨のチップの重量 (mg)

ンダーで切断・骨髄除去・チップ形成を行った。
(3.3 ハマグリのプロトコル参照)

トリ骨のチップは各照射量に対して 2 羽のトリをセットとし、大腿骨および脛骨からチップを作成した。図 1.1-5 に照射した試料より取り出したチップの重量、図 1.1-6 に照射量とチップの重量のばらつき、図 1.1-7 にはトリ骨のチップの ESR シグナル強度を示した。

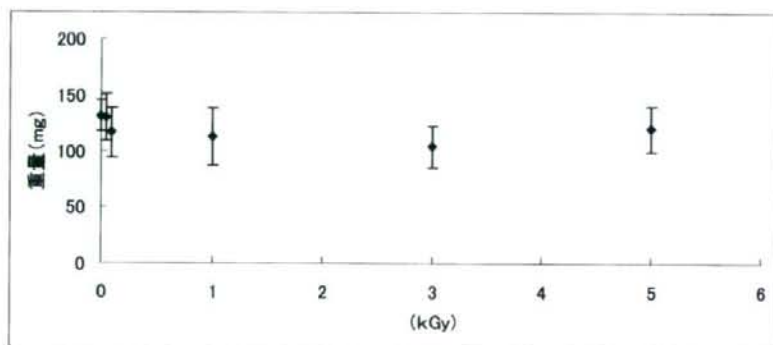


図 1.1-6 トリ骨のチップ重量 (mg) と照射量の関係
各照射プロットのバーは平均重量の標準偏差を示す。

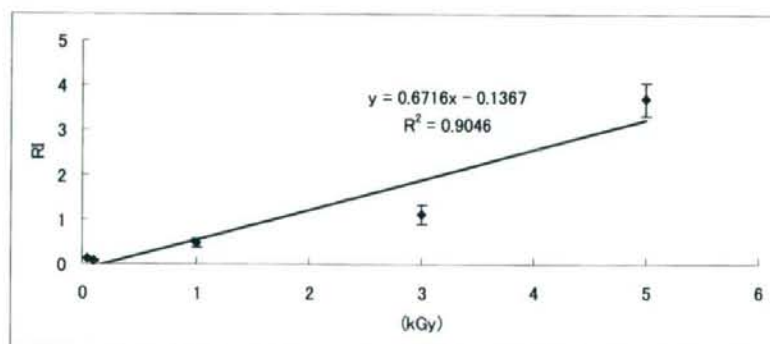


図 1.1-7 トリ骨のチップの ESR シグナル強度 (マンガンマーカとの相対強度比と照射量の関係; 各照射プロットのバーは平均シグナル強度の標準偏差を示す)

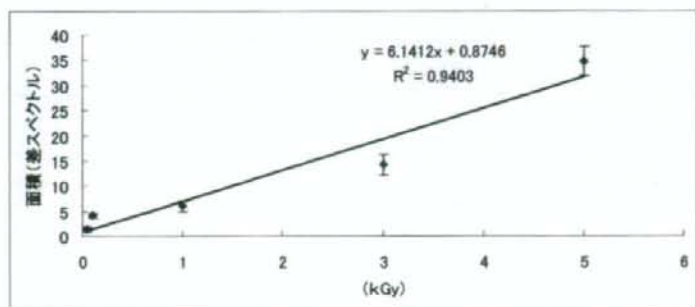


図11-8 トリ骨のチップのESRシグナル面積値の関係(各照射量のスペクトルから非照射のスペクトルを差し引いて作成。プロットのバーは平均シグナル強度の標準偏差を示す)

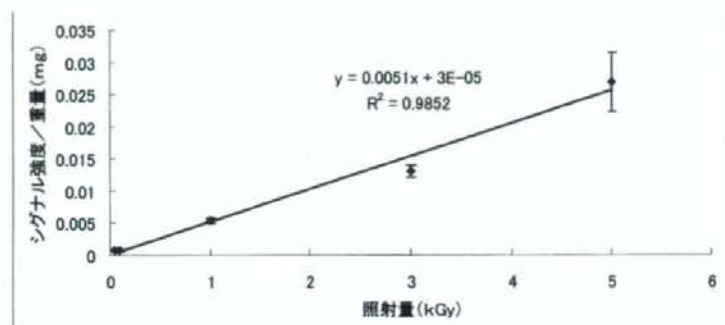


図11-9 トリ骨のチップのESRシグナル強度を各試料の重量で規格した値と各照射量の関係:各照射プロットのバーは平均面積値の標準偏差を示す

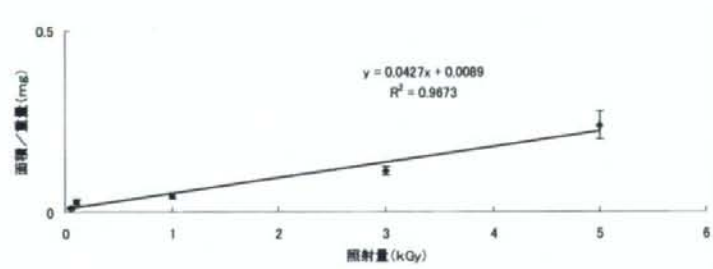


図11-10 トリ骨のチップのESRスペクトル面積と照射量の関係
各照射プロットのバーは平均面積値の標準偏差を示す。

図11-8は非照射の試料より得られたESRスペクトルを使い(1つだけ)、各照射で得られた差スペクトル作成し、そのシグナル(図11-4参照)の面積を求めた。

以上のように、各照射量について、ESRシグナル強度(マンガンマーカによる相対強度比)・

各試料の重量によるESRシグナル強度の規格化、さらに差スペクトル(0kGyのシグナルを差し引く操作)においてシグナルの面積を求め各試料の重量で規格化を行った。なお、図11-5・6においては0kGyの試料の重量がデータに含まれているが、非照射のシグナルのパターンが明

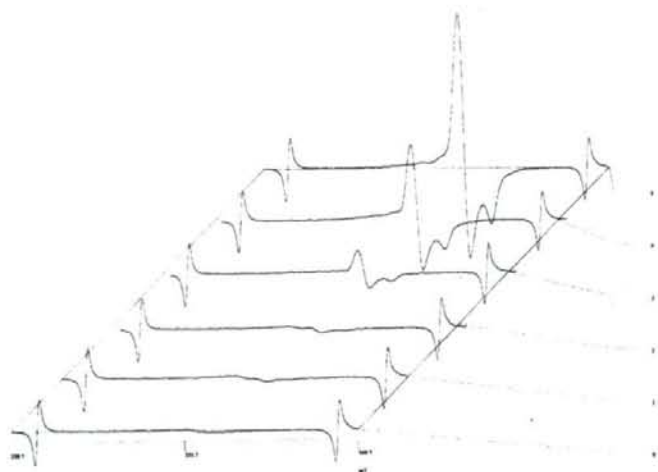


図11-11 トリ骨チップの放射線量依存的なESRスペクトルの変化
下より0 (非照射)・0.05・0.1・1・3・5 kGyの照射量である。各スペクトルの両端のシグナルはマンガンマーカ (3本めと4本目) である。

らかに異なるため、プロットにはそのデータは使
わなかった。また、差スペクトルにおいて差し引
くための非照射の試料は、便宜上、図11-4の
0 kGy・No. 1の試料を使用し、マンガンマー
カーの磁場値で修正し算出した。

各照射試料のスペクトルを図に示す。図7-
24から照射依存的に変化していることが確認で
きる。

以上の図およびスペクトルから今回の照射量範
囲におけるESRスペクトルの照射量依存性は確
認できた。

11.4 トリの骨チップのESRパターンとそ

の検知のための要素

各低照射量 0・0.05・0.1・1 kGyのス
ペクトルを図に示す。

この4つの図から非照射と0.05 kGyのスベ
クトルから照射・未照射が確認できるか、ある
いは、0.05 kGyと0.1 kGyの照射量言うの
の確認は可能と判断される。そこで、これらの
スペクトルを用いて、照射判定の要素を検討した。
まず、スペクトルのg値及びその間隔 (mT) を
スペクトルに示す。

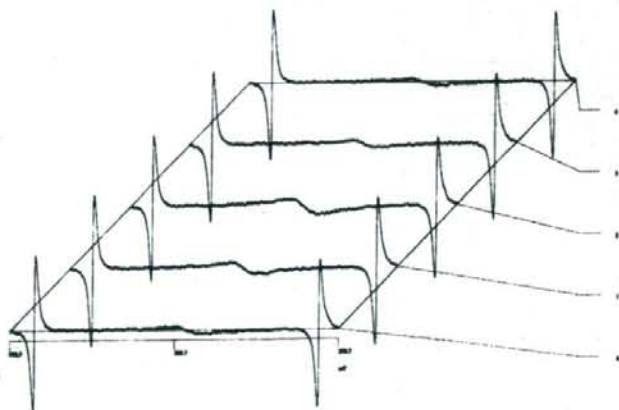


図11-12 非照射試料のトリの骨チップのESRスペクトル

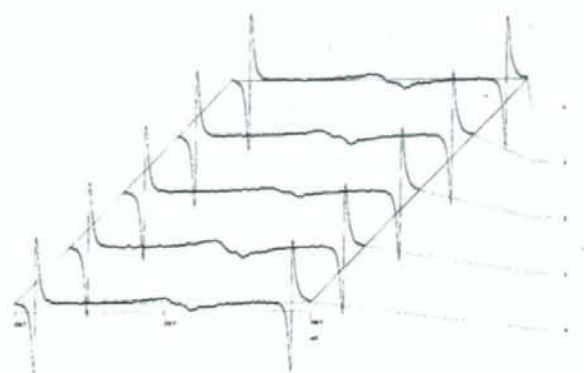


図11-13 0.05 kGy照射したトリの骨チップのESRスペクトル

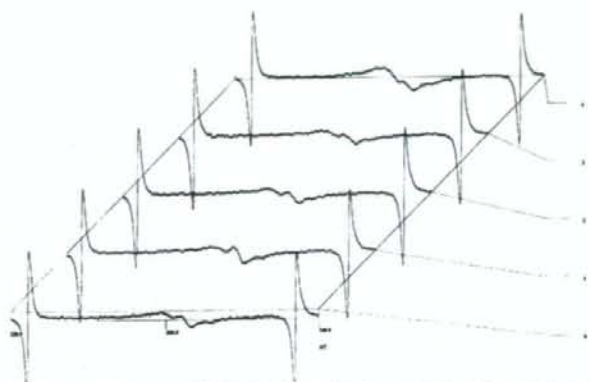


図11-14 0.1 kGy照射したトリの骨チップのESRスペクトル

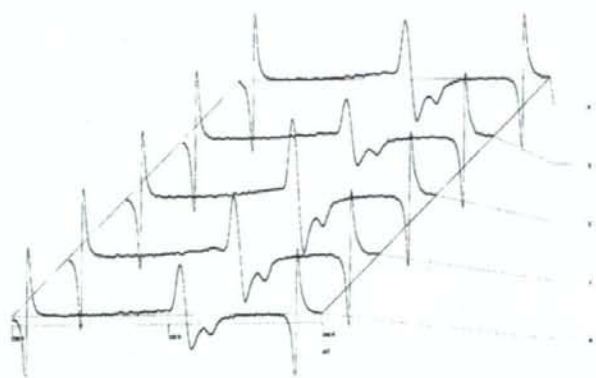


図11-15 1 kGy照射したトリの骨チップのESRスペクトル

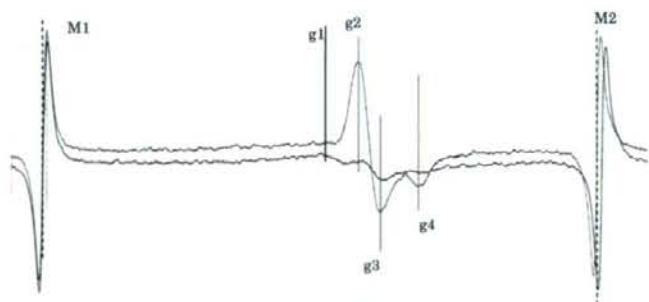


図 1 1 - 1 6 0.1 および 1 k Gy 照射のトリの骨チップの ESR スペクトル

	M1	M2	g1	g2	g3	g4
磁場 (m T)	331.328	340.005	335.732	336.243	336.586	337.218
g 値	2.03288	1.9810	2.0062	2.0032	2.0011	1.9974
間隔	M1-M2		g2-g3	g3-g4	g2-g4	
磁場 (m T)	8.676		0.343	0.632	0.975	

図 1 1 - 1 7 0.05 および 0.1 k Gy 照射のトリの骨チップの ESR スペクトルにおける指定した各共鳴磁場および g 値

線量 (kGy)	No.	磁場 (m T)					
		M1	M2	g1	g2	g3	g4
0	1	331.373	340.050	335.732			
	2	331.316	339.992	335.674			
	3	331.334	340.011	335.608			
	4	331.313	339.990	335.713			
	5	331.390	340.061	335.713			
0.05	1	331.390	340.061	335.713	336.226	336.609	337.294
	2	331.265	339.942	335.645	336.241	336.542	337.228*
	3	331.417	340.089	335.732	336.321	336.678	337.228*
	4	331.321	339.993	335.609	336.226	336.595	337.228*
	5	331.321	339.993	335.609	336.226	336.595	337.228*
0.1	1	331.413	340.089	335.716	336.374	336.676	337.265
	2	331.338	340.016	335.643	336.267	336.609	337.192
	3	331.395	340.066	335.643	336.299	336.669	337.192
	4	331.324	340.001	335.575	336.232	336.602	337.126
	5	331.401	340.077	335.502	336.294	336.637	337.226*
1	1	331.401	340.077	*335.502	336.326	336.655	337.285
	2	331.261	339.938	335.552	336.182	336.511	337.169
	3	331.345	340.022	335.539	336.252	336.608	337.212
	4	331.254	339.931	335.538	336.154	336.509	337.134
	5	331.395	340.066	335.655	336.313	336.669	337.271
3	1	331.416	340.092	*335.582	336.337	336.679	337.296
	2	331.287	339.958	335.582	336.216	336.545	337.191
	3	331.266	339.943	*335.509	336.188	336.524	337.177
	4	331.349	340.027	*335.691	336.276	336.600	337.258
	5	331.283	339.959	*335.624	336.209	336.554	337.190
5	1	331.322	339.999	335.215	336.243	336.600	337.216
	2	331.562	340.239	335.962	336.483	336.826	337.442
	3	331.332	340.009	335.253	336.248	336.593	337.227
	4	331.449	340.126	335.397	336.367	336.704	337.346
	5	331.351	340.022	335.746	336.272	336.606	337.239

図 11-18 トリの骨チップから求められた ESR シグナルの磁場の値

* シグナルの“ピーク”と判別が難しいもの

** 拡大するとピークらしき物が見えるが、これは F A シリーズのダイナミックレンジが広いためであり、S/N の分離がよくない状態での判断である。よって、g 値は求めないことにする。

g 値						
No.						
0kGy	M1	M2	g1	g2	g3	g4
1	2.0329	1.9810	2.0065			
2	2.0329	1.9810	2.0065			
3	2.0329	1.9810	2.0070			
4	2.0329	1.9810	2.0064			
5	2.0329	1.9810	2.0062			
0.05 k Gy						
1	2.0329	1.9806	2.0064	2.0028	2.0010	1.9970
2	2.0329	1.9806	2.0064	2.0028	2.0010	1.9969
3	2.0324	1.9806	2.0063	2.0028	2.0006	1.9974
4	2.0324	1.9806	2.0064	2.0028	2.0055	1.9968
5	2.0325	1.9806	2.0065	2.0028	2.0006	1.9969
0.1 k Gy						
1	2.0329	1.9810	2.0068	2.0029	2.0011	1.9976
2	2.0329	1.9810	2.0068	2.0031	2.0011	1.9976
3	2.0324	1.9805	2.0066	2.0027	2.0005	1.9974
4	2.0329	1.9810	2.0071	2.0032	2.0011	1.9979
5	2.0329	1.9810	2.0080	2.0033	2.0013	1.9978
1 k Gy						
1	2.0329	1.9810	2.0070	2.0031	2.0012	1.9973
2	2.0324	1.9806	2.0065	2.0027	2.0006	1.9968
3	2.0329	1.9810	2.0075	2.0032	2.0011	1.9975
4	2.0329	1.9810	2.0069	2.0033	2.0011	1.9974
5	2.0324	1.9806	2.0066	2.0027	2.0006	1.9970
3 k Gy						
1	2.0329	1.9810	2.0076	2.0031	2.0011	1.9974
2	2.0325	1.9806	2.0064	2.0027	2.0007	1.9969
3	2.0329	1.9810	2.0072	2.0031	2.0011	1.9973
4	2.0329	1.9810	2.0066	2.0031	2.0012	1.9973
5	2.0329	1.9810	2.0066	2.0031	2.0010	1.9973
5 k Gy						
1	2.0329	1.9810	2.0093	2.0031	2.0010	1.9974
2	2.0329	1.9810	2.0062	2.0031	2.0011	1.9974
3	2.0329	1.9810	2.0091	2.0032	2.0011	1.9974
4	2.0329	1.9810	2.0089	2.0032	2.0011	1.9973
5	2.0324	1.9806	2.0058	2.0027	2.0007	1.9970
平均	2.0327	1.9809	2.0069	2.0030	2.0011	1.9973
SD	0.0002	0.0002	0.0009	0.0002	0.0009	0.0003

図 11-19 トリの骨チップから求められた ESR シグナルの磁場の g 値

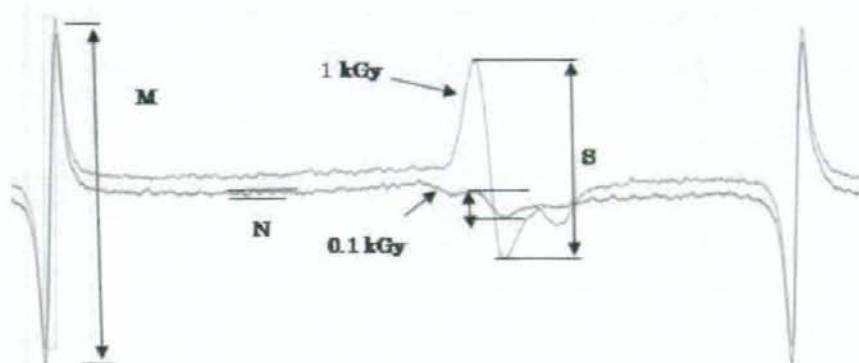


図 11-20 低線量照射したトリの骨チップの ESR スペクトル

上記、図 11-17 の値が、測定した値と一致するか検討を行った。なお、照射量 0 kGy の試料においては、図中の $g_2 \sim g_5$ までの“くさび形”のスペクトルパターンは見られないため (**)、これらのデータは除外した。

以上のような結果からスペクトル上の各位置 (g 値) は、平均値がより正しい g 値であると考えられるが、実用範囲を想定して、次のような大まかな g 値を設定する。

$M1 = 2.032 \pm 0.001$, $M2 = 1.981 \pm 0.001$,
 $g1 = 2.006 \pm 0.001$, $g2 = 2.003 \pm 0.001$,
 $g3 = 2.002 \pm 0.001$,
 $g4 = 1.997 \pm 0.001$.

さらに、実用的なシグナルの幅 (間隔) は、
 $M1-M2 = 8.68 \pm 0.01$ mT,
 $g2-g3 = 0.34 \pm 0.01$ mT,
 $g3-g4 = 0.63 \pm 0.01$ mT
 $g2-g4 = 0.97 \pm 0.01$ mT

と、設定する。
 0.1 kGy のシグナル強度とノイズレベルを比較すると、
 $S/N = 110 / 34 = 3.24$
 である。かろうじて S/N 比 3 以上であった。

マンガンマーカールとの比較は、
 $S/M = 110 / 1244 = 0.088$

である。
 1 kGy のシグナル強度とノイズレベルを比較すると、
 $S/N = 453 / 34 = 13.32$
 である。

マンガンマーカールとの比較は、
 $S/M = 453 / 1238 = 0.366$
 である。

2 つの骨チップは異なる個体から作成したものであるが、照射量は 10 : 1 であるが、 S/M の ESR 信号強度は約 4 : 1 であった。非照射の試料 (個体が異なる) の骨チップのシグナルに 10 分の 1 に縮小・加工した 1 kGy の ESR スペクトルを加算・加工した。その結果、加算・加工した ESR シグナルの強度は、 $SR/MR = 91.1 / 1360.2 = 0.067$ 、一方、実測 $SI/M1 = 110 / 1244 = 0.088$ となった。非照射ですでにバックグラウンドのシグナルが出ていることを考慮すれば、妥当な数字と考えられる。以上の結果から、0.1 kGy であれば、 S/N 比を 3 以上であること、また、加算・加工したスペクトルと妥当性があることから、照射した試料と判断できる可能性がある。バックグラウンドの大きさにもよることから、実際の照射・未照射を判別するのは、0.5kGy が限界と思われる。

12. 牛骨

12.1 牛骨 (あばら) の条件設定

(1) ESR の測定条件

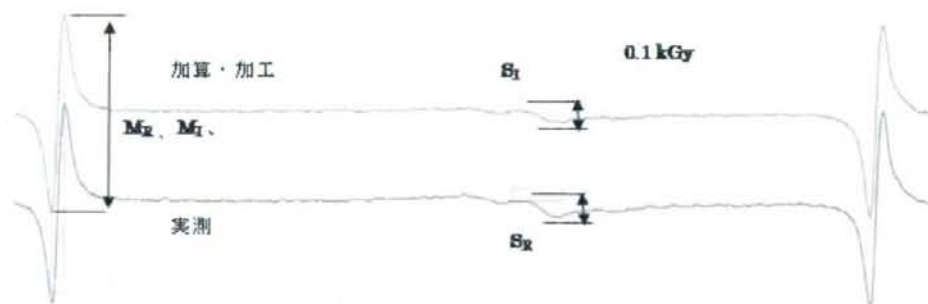


図11-21 実測と加算・加工したスペクトル

キャビティの内標準物質であるマンガンマーカ-の6本のシグナルのうち、3番目と4番目の間に照射後のシグナルが検出できることから、これらのESRシグナルが現在の装置で問題なく測定可能である条件を設定した。なお、照射強度によりシグナル変化から、シグナル強度は照射量に依存し、また、複数のシグナルが重なっていると判

断されたため、5 kGyの照射した試料のシグナルをもとに磁場変調においては、スペクトル全体がゆがまず、かつ、最大信号強度付近になる値を設定した。

この値は磁場変調周波数100 kHz / 0.2 mTである。また、マイクロ波出力においては、信号強度と平方根（出力値）の関係が直線になる値を

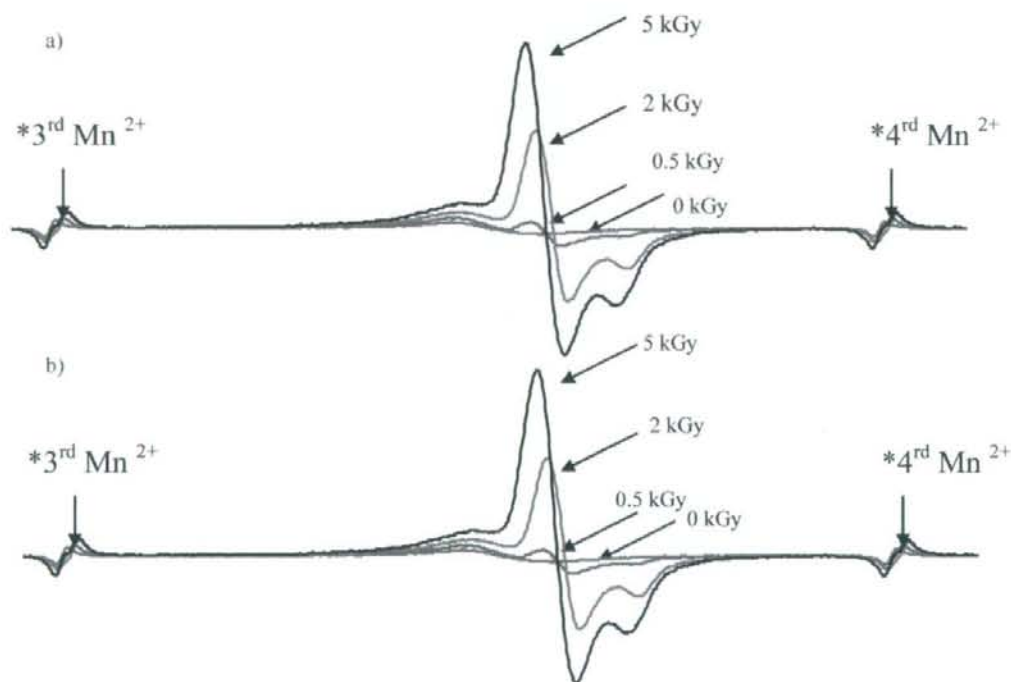


図12-1 照射量依存性を示す牛骨のESRスペクトル

(a) 照射量依存的なスペクトル (b) 0 kGyを元に各照射量の試料のスペクトルより差スペクトルを求めた結果。

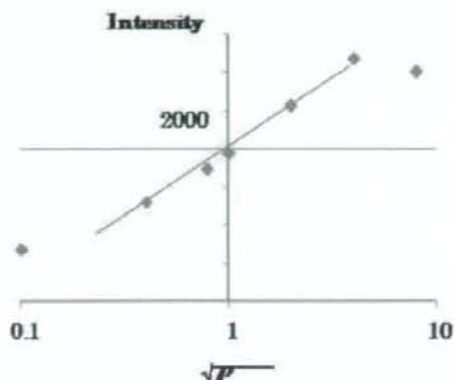


図12-2 牛骨(照射量5 kGy)のシグナル強度とマイクロ波出力値の関係

求めた。その結果、2 mWと決定した。

試料量は、各照射によって個体差が生じたデータとなるため、試料の高さ(長さ)を16.0~17.0 mmに調整、その結果、試料重量は99~126 mgとなった。CV(%)においては、重量が約12%、長さは約4%となった。ここでの目的がESRの測定条件であるため、照射試料のラジカル量に与える影響は微小と考え補正は行わなかった。

牛骨のESR条件(例)

Microwave: 9426.507 MHz / 2mW *
 Field: 335.862 ± 5mT *
 modulation: 100kHz / 0.2 mT
 TC: 0.1sec, Sweep Time: 2min *
 AMP: × 80 *
 マーカーの値: 600~800 *

*マイクロ波周波数は、サンプルの試料の大きさ・形状(曲がり・直線性など)によって、また、若干の水分含量などによって共鳴周波数の値は変動する。

*共鳴磁場は、上記の共鳴周波数によって決定するため(操作上の優先順位のため)、マンガンマーカーを含めた全体のシグナルが低磁場側あるいは高磁場側へ若干ずれることがある。この場合は、左右のマンガンマーカーのシグナルが1.0 mTの

磁場掃引幅に入るように設定する。

*時定数(Time Constant: TC)と掃引時間は、磁場掃引幅とS/N比の関係から、最適値があるためこの値とした

*AMP(拡大・縮小)においては、今回使用した日本電子製のESR装置(FAシリーズではダイナミックレンジが広く取られている)がデジタル信号処理され、スペクトル表示される。よって、標準表示で提供される幅の中でこの値を決定した。

(2) ESR測定条件 2

マンガンマーカーのキャピティへの挿入値は、試料の0.5 kGy照射したものを参考にして、決定した。ただし、ロットによってマンガンマーカーは、同一条件下において線幅および信号強度にばらつきが生じる可能性がある。600~800の値とした。

(3) 牛骨の試料管に詰める量の検討

市販されているESR試料管の長さは30 cmほどあり、取り扱いが面倒である。また、試料作成においても、測定に十分な量が確保できれば前処理も簡易になると考えられる。そこで、ESRの測定部およびラジカルの検出方法を考慮して、試料管に充填する牛骨のチップの長さや重量を測定した。すでに、アラニンペレットの検討した結果を考慮し、結果は以下のテーブルに示すとおり。試料は0~5 kGyを照射したものを図12-3にまとめた。骨の場合、骨のチップの作成から実験がスタートしているが、上記の図で示すように、チップの重量および厚みをそろえることは困難である。また、幅はESR試料管の太さで決まるため、これらチップのサイズのばらつきは作成時の段階

No.	重量 (mg)	厚み (mm)	幅 (mm)	長さ (mm)
1	99	1.2	4.3	19.5
2	126	1.2	3.7	21.5
3	96	1.4	3.6	21
4	112	1.1	3.8	20
平均値	108.3	1.23	3.85	20.5
標準偏差	13.72	0.13	0.31	9.13
CV(%)	12.67	10.27	8.08	4.45

図12-3 牛骨のチップのサイズと重量のばらつき

すでに試料管に大きさにそろえているため、このようなばらつきの少ない数字となった。今回、長さを16~17mmでそろえることにより、図12-1で示されるような照射量依存的なプロットが作成できたことを考え、さらに、マイクロ波の磁界の分布が大きく影響を与えていることから、測定部における充填率約20~40mmの範囲で測定を行うことにした。各試料の大きさはそろえる必要がある。

(4) ESRスペクトルの同定

差スペクトルの算出したスペクトルは図12-1である。このスペクトルがずれているのは、元のスペクトルの共鳴周波数・磁場がずれているため、一見、 g 値がずれているように見えるが、同じ値を示した。よって、スペクトルのパターンおよび g 値より差スペクトルで観測される放射線照射量依存性のあるスペクトルはハイドロキシアパタイトが骨の組織に含有された状態で観測された物と判断した。照射していない骨と照射した骨の差スペクトルをとり、 g 値の計算を行った。その結果、未照射の骨において確認されるシグナルの g 値は2.0050(図中なし)、照射試料および差スペクトルから得られた g 値は、2.0018および1.9989であった。このことから、非照射においてあるいは照射後にも確認される低磁場側のシグナルは、カーボンあるいは有機ラジカルと推定され、一方、照射量に依存してシグナル

強度が大きくなる物は、骨の構成成分であるハイドロキシアパタイトが骨組織に内包されてラジカル化されているものと判断した。

g 値の算出には、マンガンマーカの g 値とそのマーカースIGNALの間隔から、試料スペクトルに記した矢印の g 値を算出した。これには日本電子製のFAシリーズの機能である周波数によるマンガンマーカの g 値補正プログラム(標準装備)で行った。

12.2 牛骨のESRシグナル照射量依存性の確認

コバルト60による照射量は、0.05・0.1・1・3・5 kGyである。0 kGyは本研究室で保管した物を用いた。各照射量に対して個体数5個以上、照射後、凍結保存し、解凍後、グラインダーで切断・骨髄除去・チップ形成を行った。(3.3 牛骨のプロトコル参照)

牛骨のチップは1頭の牛から取り出したあばら肉付き骨を10×10cmのブロックにしたブロックを各照射量に対して2つをセットとし、照射後、牛骨チップを作成した。図12-5に照射した試料より取り出したチップの重量、図12-6に照射量とチップの重量のばらつき、図12-7には牛骨のチップのESRシグナル強度を示した。

図12-8は非照射の試料より得られたESRスペクトルを使い(1つだけ)、各照射で得られた

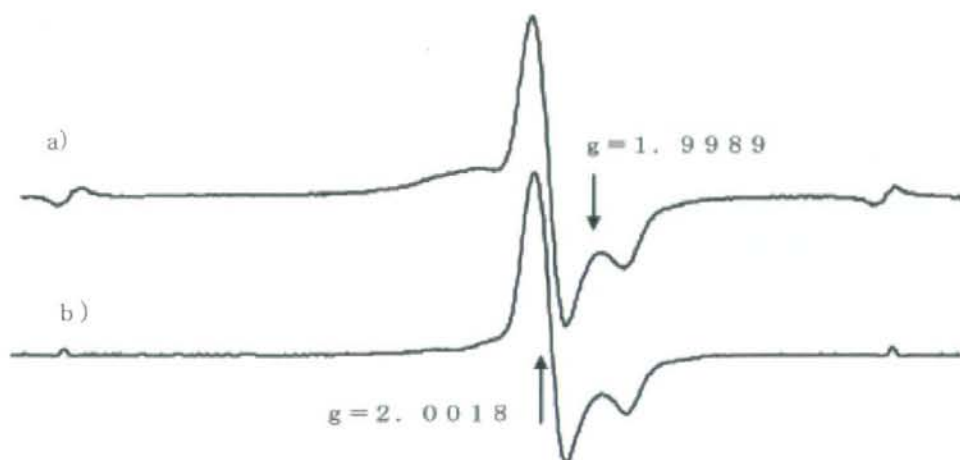


図12-4 牛骨のオリジナルと差スペクトル

NO	照射量 (kGy)					
	0	0.05	0.1	1	3	5
1	227	228	271	361	343	350
2	235	298	273	619	427	399
3	167	292	209	538	395	352
4	174	237	266	670	385	427
5	131	280	233	567	383	307
平均値 (m g)	160.6	223.01	203.8	437.8	310.6	306.6

図 12-5 牛骨のチップの重量 (m g)

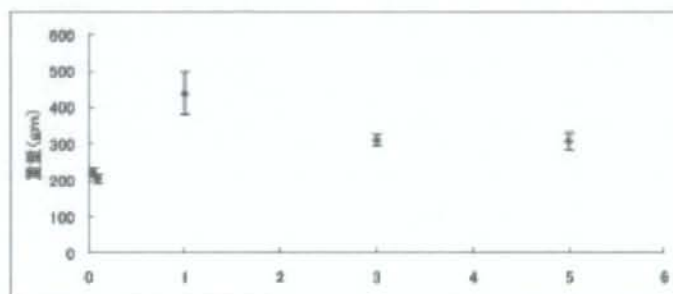


図 12-6 牛骨のチップ重量 (m g) と照射量の関係 各照射プロットのバーは平均重量の標準偏差を示す。

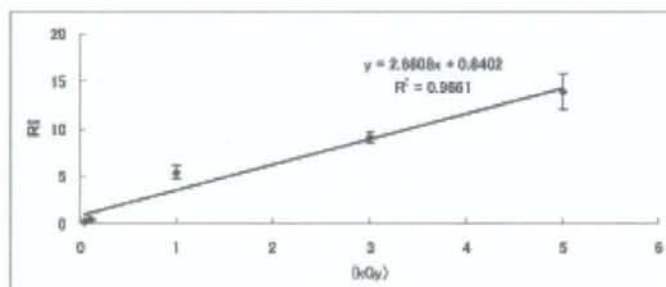


図 12-7 牛骨のチップの ESR シグナル強度 (マンガンマーカールとの相対強度比と照射量) の関係 ; 各照射プロットのバーは平均シグナル強度の標準偏差を示す

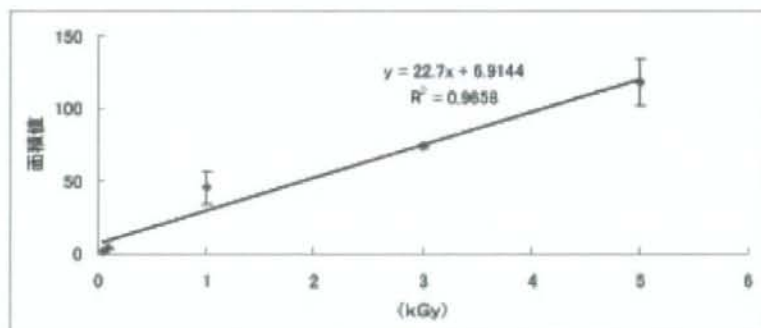


図 12-8 牛骨のチップの ESR シグナル面積値の関係 (各照射量のスペクトルから非照射のスペクトルを差し引いて作成。プロットのバーは平均シグナル強度の標準偏差を示す) *0.05kGy の照射において、差スペクトルの位相がずれるために、面積値を求めると、マイナスの値を計算してしまうため、このデータはこのプロットでは使用していない。0.5kGy においては n=4 である。

差スペクトル作成し、そのシグナル (図 12-4 参照) の面積を求めた。

以上のように、各照射量について、ESR シグナル強度 (マンガンマーカールによる相対強度比) ・各試料の重量による ESR シグナル強度の規格化、さらに差スペクトル (0 kGy のシグナルを差し引く操作) においてシグナルの面積を求め各

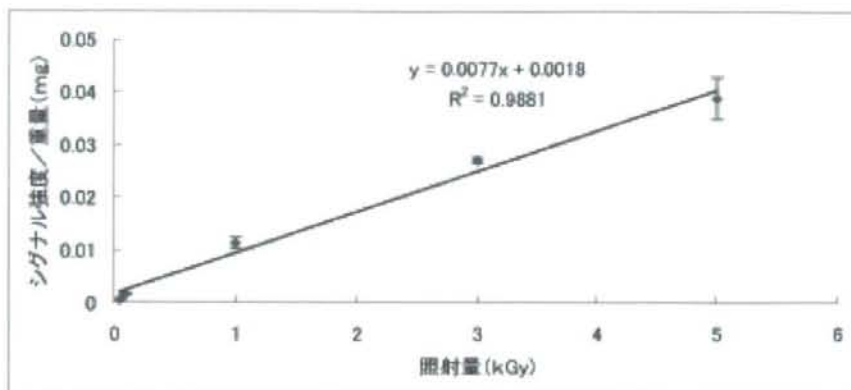


図12-9 牛骨のチップのESRシグナル強度を各試料の重量で規格した値と各照射量の関係：
各照射プロットのバーは平均面積値の標準偏差を示す

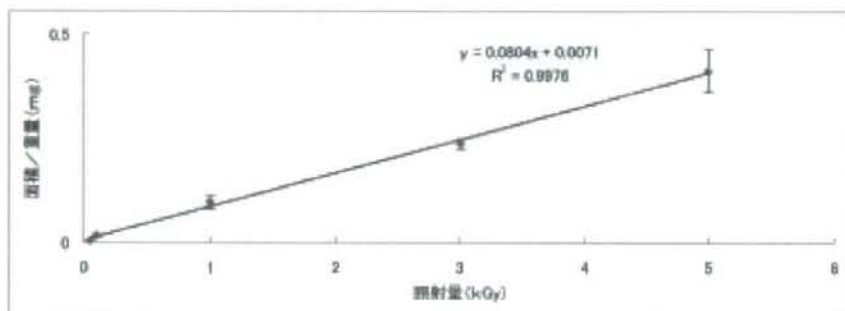


図12-10 牛骨のチップのESRスペクトル面積と照射量の関係
各照射プロットのバーは平均面積値の標準偏差を示す。

試料の重量で規格化を行った。なお、図12-5・6においては0 kGyの試料の重量がデータに含まれているが、非照射のシグナルのパターンが明らかに異なるため、プロットにはそのデータは使わなかった。また、差スペクトルにおいて差し引くための非照射の試料は、便宜上、図12-4の0 kGy・No. 1の試料を使用し、マンガンマーカ―の磁場値で修正し算出した。

各照射試料のスペクトルを図に示す。図12-11から照射依存的に変化していることが確認できる。
以上の図およびスペクトルから今回の照射量範囲におけるESRスペクトルの照射量依存性は確認できた。

12.3.1 牛骨チップのESRパターンとその

検知のための要素

各低照射量 0・0.05・0.1 kGy照射後のESRスペクトルを図に示す。

図13-14 0.1 kGy照射した牛骨チップのESRスペクトル

この4つの図から非照射と0.05 kGyのスペクトルから照射・未照射が確認できるkか、あるこの4つの図から非照射と0.05 kGyのスペクトルから照射・未照射が確認できるkか、ある

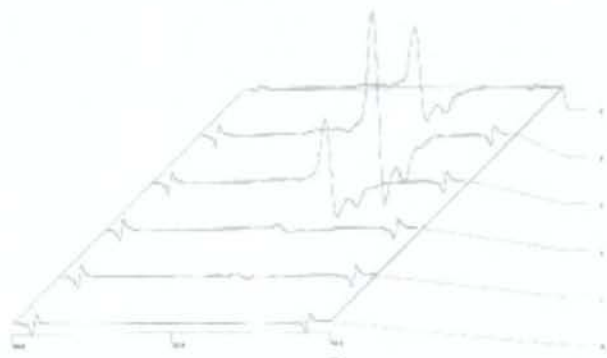


図12-11 牛骨チップの放射線量依存的なESRスペクトルの変化
下より0 (非照射)・0.05・0.1・1・3・5 kGyの照射量である。各スペクトルの両端のシグナルはマンガンマーカ― (3本めと4本目) である。

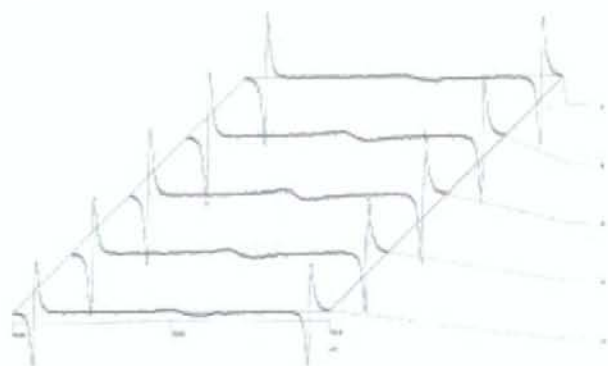


図12-12 非照射試料の牛骨チップのESRスペクトル

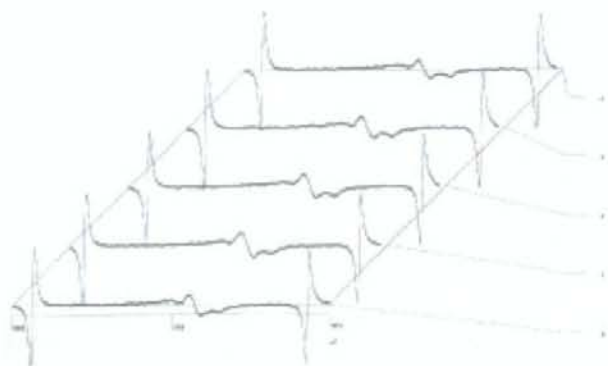


図12-13 0.05 kGy照射した牛骨チップのESRスペクトル

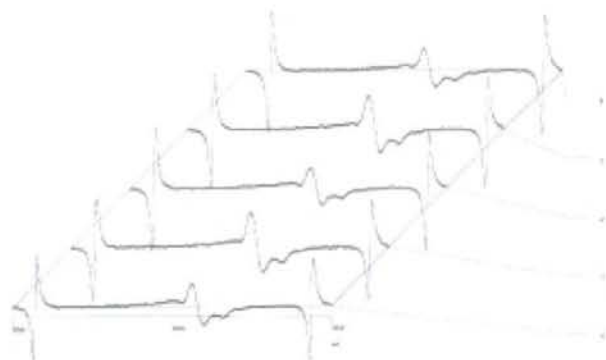


図12-14 0.1 kGy照射した牛骨チップのESRスペクトル

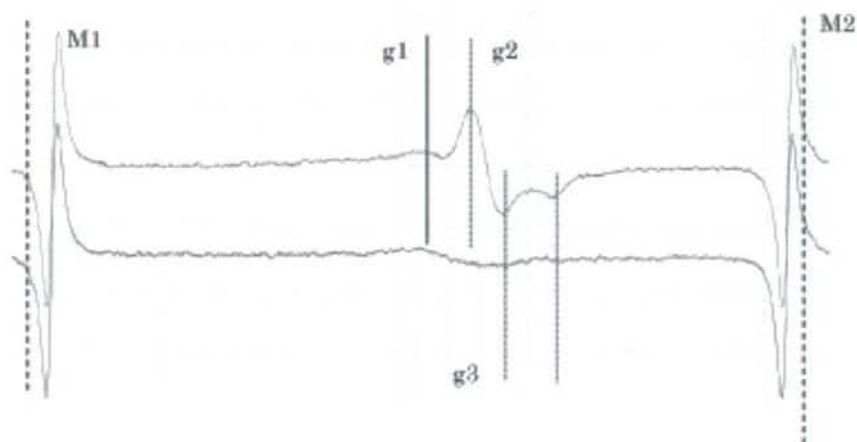


図12-15 未照射および1 kGy照射のトリの骨チップのESRスペクトル

いは、0.05 kGyと0.1 kGyの照射量言うのスペクトルに示す。
 の確認は可能と判断される。そこで、これらの0.1kGy以上の照射した試料では、明らかにg1
 スペクトルを用いて、照射判定の要素を検討した。のシグナルの位置（共鳴磁場・g値）が未照射の
 まず、スペクトルのg値及びその間隔（mT）を試料と異なっていた。

	M1	M2	g1	g2	g3	g4
磁場 (mT)	331.199	339.874	335.557	336.119	336.502	337.078
g 値	2.03289	1.9810	2.0065	2.0031	2.0009	1.9974
間隔	M1-M2		g2-g3	g3-g4	g2-g4	
磁場 (mT)	8.675		0.383	0.576	0.959	

図12-16 未照射および1 kGy照射のトリの骨チップのESRスペクトルにおける指定した各共鳴磁場およびg値

上記、図13-18の値が、測定した値と一致するか検討を行った。なお、照射量0 kGyの試料においては、図中のg2～g5までの“くさび形”のスペクトルパターンは見られないため（**）、これらのデータは除外した。