# 修士論文

超高エネルギーニュートリノ検出器のための 電波反射測定とシミュレーション

# 矢野浩之

首都大学東京大学院 理工学研究科 物理学専攻 修士課程2年

超高エネルギー宇宙線  $(E > 4 \times 10^{19} eV)$  が複数の宇宙線エアシャワー観測施設 において観測され、その存在が確認されている。これらの超高エネルギー宇宙線の 発生起源は未確認であるが、活動銀河核やガンマ線バーストを発生起源とするこ とが推測されている。超高エネルギー宇宙線は宇宙空間を伝搬する過程において、 宇宙を満たしているマイクロ波背景輻射と相互作用を起こすことにより、エネル ギーを失い、それに伴って超高エネルギーニュートリノ (10<sup>16</sup>eV ~10<sup>20</sup>eV) を発生 させることが予測されている。このエネルギー損失過程はオージェなどのエアシャ ワー観測実験において、確認されている。エアシャワーは媒質が入射粒子と電磁相 互作用、あるいは強い相互作用することによって雪崩状に発生する。超高エネル ギーニュートリノの媒質との相互作用によって発生するシャワーを検出するために、 レーダー法を用いた検出器を開発研究している。超高エネルギーニュートリノと物 質との相互作用断面積測定によって、通常の加速器実験では得られない超高エネル ギー領域での素粒子標準モデルの検証を行うことが出来る。しかしながら、この超 高エネルギーニュートリノの飛来頻度は極めて低いこと(≒1個/km<sup>2</sup>·day)が予 想される。この為これを検出するには巨大な質量の検出器媒質(3km×3km×3km、 50Gt 以上) が必要で、人工的にこの規模の媒質を用意することは困難である。し たがって、自然界に存在する固体または液体の媒質を利用する必要がある。この 様な大質量中のニュートリノシャワーを検出するために、我々はレーダー法を提唱 している。レーダー法は、巨大媒質中での超高エネルギーニュートリノの相互作 用によって発生するシャワーからの電波反射を検出することで、超高エネルギー ニュートリノの飛来を検出する手法である。この為、レーダー法に使用する検出 媒質は電波減衰長が長いものが望ましい。岩塩鉱や南極氷床が充分長い電波減衰 長を持つか確認する必要がある。我々の研究グループでは、X線(KEK-PF)ある いは電子ビーム (日本原子力研究開発機構、高崎量子応用研究所)を照射した媒質 へ、電波を送信し、そこからの電波反射を(エネルギー反射率(~10<sup>-6</sup>))観測し た。これらの実験研究によって、局所的な温度上昇がもたらす、媒質の誘電率の 上昇によって発生した屈折率境界へ電波を照射することによって、電波反射が起 きると解釈できる。レーダー法は、この現象を利用して、超高エネルギーニュー トリノが生成するシャワーを検出する手法である。レーダ法の基礎的な研究とし て、より詳細な電波反射機構解明のために電子ビームを照射し電波反射測定の実 験を行った。電気信号を伝播するための同軸管に検出媒質の候補である、岩塩ま たは氷を充填し、同軸管開放端面に超高エネルギーニュートリノのエネルギー損 失に相当する電子ビームを照射し、反射電波の振幅変化ならびに位相変化の両方 を測定した。この実験結果を理解するために、シミュレーションによる検討を行っ た。粒子と物質の相互作用をシミュレートする Geant4 によって、実験で用いたも のと同じサイズの同軸管の開放端面に、電子ビームを入射させ、位置に依存するエ

ネルギー損失を求めた。同軸管中の熱伝導および電波反射のシュミレータとして、 COMSOL AB 社 (スウェーデン) 製 COMSOL Multiphysics バージョン 4.3b(有限 要素法シュミレータ)を用いた。このプログラムの特徴として、複数の物理現象 の連成シミュレーションが可能である。プログラムコード Geant4 によって得たエ ネルギー損失の位置分布を熱源として与え、電波反射と熱拡散の連成シミュレー ションを行った。シミュレーション結果の温度分布および時間依存性、それに加 えて電波反射の位相変化とそれから得られるエネルギー反射率の時間依存性を実 験データと比較した。実験条件を完全にシミュレーションで再現することは難し く、温度上昇に関して、シミュレーションは実験に対して、温度上昇が50%以内 で一致した。その結果から期待される様に、電波反射の位相とエネルギー反射率 は実験に対して、最大2倍以内の大きさの結果が得られ、シミュレーションにお いても、媒質の温度上昇による屈折率の非一様性領域からの電波反射が確認でき た。また、レーダー法の実践においては、少ない数のレーダーによって粒子反応を 検出するために、氷や岩塩などの検出媒質の電波減衰長が1km 近く必要である。 VHF、UHF 領域での氷の電波減衰長を推定するために、国立極地研究所の低温室 を利用し、-30 ℃の環境下において摂動空洞共振器法によって、氷の複素誘電率を 測定した。この予備的結果として、500m以上の電波減衰長が得られている。

目 次

1	序論	Ì	11
	1.1	ニュートリノ	11
	1.2	超高エネルギーニュートリノ	13
	1.3	活動銀河核(AGN)	13
	1.4	ガンマ線バースト(GRB)	13
	1.5	GZK カットオフ	14
	1.6	Gurgen Ashotovich Askar ' yan の提案による超高エネルギーニュー	
		トリノ検出器の研究	15
	1.7	レーダー法(電波反射)によるニュートリノ検出器の研究	16
<b>2</b>	レー	ダー法の検出媒質	16
	2.1	V・UHF 帯における低損失誘電材料の複素誘電率測定	18
	2.2	摂動空洞共振器法	19
	2.3	円筒空洞共振器における摂動公式	21
	2.4	誘電の原理	24
	2.5	誘電率からの電波減衰長の導出	26
	2.6	低温室における氷の誘電率測定	26
	2.7	氷の電波減衰長	27
3	電子	ビーム照射実験による電波反射測定	30
3	電子 3.1	·ビーム照射実験による電波反射測定 電子ビーム加速器	<b>30</b> 30
3	電子 3.1 3.2	·ビーム照射実験による電波反射測定 電子ビーム加速器	<b>30</b> 30 33
3	電子 3.1 3.2	・ビーム照射実験による電波反射測定         電子ビーム加速器       ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	<b>30</b> 30 33 33
3	電子 3.1 3.2	ビーム照射実験による電波反射測定         電子ビーム加速器         実験装置の概要         3.2.1         同軸管         3.2.2         冷却箱	<b>30</b> 30 33 33 38
3	電子 3.1 3.2	ビーム照射実験による電波反射測定電子ビーム加速器実験装置の概要3.2.1同軸管3.2.2冷却箱3.2.3測定回路	<ul> <li><b>30</b></li> <li>33</li> <li>33</li> <li>38</li> <li>39</li> </ul>
3	電子 3.1 3.2	ビーム照射実験による電波反射測定         電子ビーム加速器         実験装置の概要         3.2.1         同軸管         3.2.2         冷却箱         3.2.3         測定国路         3.2.4	<ul> <li><b>30</b></li> <li>33</li> <li>33</li> <li>38</li> <li>39</li> <li>40</li> </ul>
3	電子 3.1 3.2	ビーム照射実験による電波反射測定電子ビーム加速器実験装置の概要3.2.1同軸管3.2.2冷却箱3.2.3測定回路3.2.4測定装置の制御3.2.5位相変化における反射波ベクトルの回転中心	<ul> <li><b>30</b></li> <li>30</li> <li>33</li> <li>33</li> <li>38</li> <li>39</li> <li>40</li> <li>43</li> </ul>
3	電子 3.1 3.2 シ	ビーム照射実験による電波反射測定電子ビーム加速器実験装置の概要3.2.1同軸管3.2.2冷却箱3.2.3測定回路3.2.4測定装置の制御3.2.5位相変化における反射波ベクトルの回転中心ミュレーションによる研究	<ul> <li><b>30</b></li> <li>33</li> <li>33</li> <li>38</li> <li>39</li> <li>40</li> <li>43</li> <li><b>47</b></li> </ul>
3	電子 3.1 3.2 シミ 4.1	ビーム照射実験による電波反射測定         電子ビーム加速器         実験装置の概要         3.2.1         同軸管         3.2.2         冷却箱         3.2.3         測定回路         3.2.4         測定装置の制御         3.2.5         位相変化における反射波ベクトルの回転中心         ミュレーションによる研究         有限要素法	<ul> <li>30</li> <li>30</li> <li>33</li> <li>33</li> <li>38</li> <li>39</li> <li>40</li> <li>43</li> <li>47</li> <li>47</li> </ul>
3	電子 3.1 3.2 シミ 4.1	ビーム照射実験による電波反射測定電子ビーム加速器実験装置の概要3.2.1同軸管3.2.2冷却箱3.2.3測定回路3.2.4測定装置の制御3.2.5位相変化における反射波ベクトルの回転中心こションによる研究有限要素法4.1.1岩塩及び氷に対する電子、ガンマー線のエネルギー損失	<ul> <li>30</li> <li>30</li> <li>33</li> <li>33</li> <li>38</li> <li>39</li> <li>40</li> <li>43</li> <li>47</li> <li>47</li> <li>48</li> </ul>
3	電子 3.1 3.2 シミ 4.1	ビーム照射実験による電波反射測定電子ビーム加速器実験装置の概要3.2.1同軸管3.2.2冷却箱3.2.3測定回路3.2.4測定装置の制御3.2.5位相変化における反射波ベクトルの回転中心こショレーションによる研究有限要素法4.1.1岩塩及び氷に対する電子、ガンマー線のエネルギー損失4.1.2有限要素法を用いた熱伝播および電波反射の連成シミュレー	<ul> <li>30</li> <li>30</li> <li>33</li> <li>33</li> <li>38</li> <li>39</li> <li>40</li> <li>43</li> <li>47</li> <li>47</li> <li>48</li> </ul>
3	電子 3.1 3.2 シミ 4.1	ビーム照射実験による電波反射測定         電子ビーム加速器         実験装置の概要         3.2.1         同軸管         3.2.2         冷却箱         3.2.3         測定回路         3.2.4         測定装置の制御         3.2.5         位相変化における反射波ベクトルの回転中心         ミュレーションによる研究         有限要素法         4.1.1         岩塩及び氷に対する電子、ガンマー線のエネルギー損失         4.1.2         有限要素法を用いた熱伝播および電波反射の連成シミュレー         ション	<ul> <li>30</li> <li>30</li> <li>33</li> <li>33</li> <li>38</li> <li>39</li> <li>40</li> <li>43</li> <li>47</li> <li>48</li> <li>51</li> </ul>
3	電子 3.1 3.2 シミ 4.1	ビーム照射実験による電波反射測定         電子ビーム加速器         実験装置の概要         3.2.1         同軸管         3.2.2         冷却箱         3.2.3         測定回路         3.2.4         測定装置の制御         3.2.5         位相変化における反射波ベクトルの回転中心         ミュレーションによる研究         有限要素法         4.1.1         岩塩及び氷に対する電子、ガンマー線のエネルギー損失         4.1.2         有限要素法を用いた熱伝播および電波反射の連成シミュレー         ション         4.1.3	<ul> <li>30</li> <li>33</li> <li>33</li> <li>38</li> <li>39</li> <li>40</li> <li>43</li> <li>47</li> <li>47</li> <li>48</li> <li>51</li> <li>61</li> </ul>
3	電子 3.1 3.2 シミ 4.1	ビーム照射実験による電波反射測定         電子ビーム加速器         実験装置の概要         3.2.1         同軸管         3.2.2         冷却箱         3.2.3         測定回路         3.2.4         測定装置の制御         3.2.5         位相変化における反射波ベクトルの回転中心         ミン         有限要素法         4.1.1         岩塩及び氷に対する電子、ガンマー線のエネルギー損失         4.1.2         有限要素法を用いた熱伝播および電波反射の連成シミュレーション         4.1.3         メッシュの設定の評価         4.1.4         測定結果とシミュレーション	<ul> <li>30</li> <li>33</li> <li>33</li> <li>38</li> <li>39</li> <li>40</li> <li>43</li> <li>47</li> <li>47</li> <li>48</li> <li>51</li> <li>61</li> <li>65</li> </ul>

## 6 参考文献

$\mathbf{A}$	付録		<b>78</b>
	A.1	測定結果とシミュレーションの比較	78
	A.2	摂動共振器法における誘電損失の評価	89
	A.3	低温室における氷の誘電率測定作業の詳細	92
		A.3.1 国立極地研究所	92
		A.3.2 国立極地研究所低温室	93
		A.3.3 試料作製	97
		A.3.4 試料加工	100
		A.3.5 偏光板を用いた測定試料の評価	104
		A.3.6 測定	104
	A.4	設計図	109
	A.5	National Instruments 社 LabVIEW 使用方法マニュアル	124
	A.6	LabVIEW ブロックダイアグラム	133
	A.7	Tektronix 社 Real-Time Spectrum Analyzer :RSA3303B 使用方法マ	
		ニュアル	134

75

# 図目次

1	アスカラヤン効果の概略図1	5
2	岩塩鉱山	7
3	各種の誘電率測定法 18	8
4	試料挿入前 19	9
5	試料挿入後 19	9
6	共振器における座標	1
7	共振器内部に電場と磁場の分布	1
8	原子分極	4
9	電子分極	4
10	配向(双極子)分極の概念図 2	5
11	誘電率の周波数依存性 22	5
12	500MHzにおける電波減衰長28	8
13	1GHz における電波減衰長 29	9
14	電波減衰長の周波数特性(氷) 29	9
15	高崎量子応用研究所1号加速器棟模型3	1
16	垂直ビーム照射装置 32	2
17	ビームプロファイル	2
18	電波測定用同軸管概略図	6
10		C
19	電波測定用回軸官与具 (宕瑥を允琪済み)  30	U
19 20	電波測定用同軸官与具 (岩塩を允項済み)	0 7
19 20 21	電波測定用同軸管与具(岩塩を允填済み) 温度測定用同軸管概略図(電波測定用に比べ、熱電対が多い。) 3' 温度測定用同軸管写真 3'	0 7 7
19 20 21 22	<ul> <li>電波測定用同軸管与具(岩塩を充填済み)</li> <li>温度測定用同軸管概略図(電波測定用に比べ、熱電対が多い。)</li> <li>37</li> <li>温度測定用同軸管写真</li> <li>38</li> <li>冷却箱写真</li> <li>38</li> <li>38</li> <li>38</li> <li>39</li> <li>31</li> <li>31</li> <li>32</li> <li>33</li> </ul>	0 7 7 8
19 20 21 22 23	電波測定用同軸管与具(岩塩を允填済み)       30         温度測定用同軸管概略図(電波測定用に比べ、熱電対が多い。)       31         温度測定用同軸管写真       31         冷却箱写真       32         冷却箱写真(蓋を載せた状態)       33	0 7 7 8 9
19 20 21 22 23 24	電波測定用同軸管与具(岩塩を充填済み)       30         温度測定用同軸管概略図(電波測定用に比べ、熱電対が多い。)       37         温度測定用同軸管写真       37         冷却箱写真       38         冷却箱写真(蓋を載せた状態)       39         測定回路の模式図       40	0 7 7 8 9 0
<ol> <li>19</li> <li>20</li> <li>21</li> <li>22</li> <li>23</li> <li>24</li> <li>25</li> </ol>	電波測定用同軸管       30         温度測定用同軸管       30         温度測定用同軸管       31         油度測定用同軸管       32         冷却箱写真       33         冷却箱写真       33         冷却箱写真       34         測定回路の模式図       44         受信機の写真       44	0 7 7 8 9 0
<ol> <li>19</li> <li>20</li> <li>21</li> <li>22</li> <li>23</li> <li>24</li> <li>25</li> <li>26</li> </ol>	電波測定用同軸管与具(岩塩を充填済み)       30         温度測定用同軸管概略図(電波測定用に比べ、熱電対が多い。)       37         温度測定用同軸管写真       37         冷却箱写真       38         冷却箱写真(蓋を載せた状態)       39         測定回路の模式図       40         測定機器一式       41	0 7 7 8 9 0 1
<ol> <li>19</li> <li>20</li> <li>21</li> <li>22</li> <li>23</li> <li>24</li> <li>25</li> <li>26</li> <li>27</li> </ol>	電波測定用同軸管       30         温度測定用同軸管       7         温度測定用同軸管       7         温度測定用同軸管       7         二度測定用同軸管       7         冷却箱写真       31         冷却箱写真       32         冷却箱写真       33         冷却箱写真       34         少信機の写真       44         型定機器       44         金属可変位相器によって位相のみを変化させた結果       45	0 7 7 8 9 0 1 1 3
<ol> <li>19</li> <li>20</li> <li>21</li> <li>22</li> <li>23</li> <li>24</li> <li>25</li> <li>26</li> <li>27</li> <li>28</li> </ol>	電波測定用同軸管与具(岩塩を充填済み)       30         温度測定用同軸管概略図(電波測定用に比べ、熱電対が多い。)       37         温度測定用同軸管写真       37         冷却箱写真(蓋を載せた状態)       38         冷却箱写真(蓋を載せた状態)       39         測定回路の模式図       40         受信機の写真       41         測定機器一式       41         金属可変位相器によって位相のみを変化させた結果       41         金属可変位相器       41	
<ol> <li>19</li> <li>20</li> <li>21</li> <li>22</li> <li>23</li> <li>24</li> <li>25</li> <li>26</li> <li>27</li> <li>28</li> <li>29</li> </ol>	電波測定用同軸管与具(岩塩を充填済み)       30         温度測定用同軸管概略図(電波測定用に比べ、熱電対が多い。)       37         温度測定用同軸管写真       37         冷却箱写真       38         冷却箱写真(蓋を載せた状態)       38         測定回路の模式図       44         受信機の写真       41         測定機器一式       42         金属可変位相器によって位相のみを変化させた結果       44         位相変化概念図1       44	
19         20         21         22         23         24         25         26         27         28         29         30	電波測定用同軸管与具(岩塩を充填済み)       30         温度測定用同軸管概略図(電波測定用に比べ、熱電対が多い。)       37         温度測定用同軸管写真       37         冷却箱写真(蓋を載せた状態)       38         冷却箱写真(蓋を載せた状態)       39         測定回路の模式図       40         受信機の写真       41         測定機器一式       41         金属可変位相器によって位相のみを変化させた結果       42         金属可変位相器       42         金属可変位相器       44         直接波の発生源(一例)       44	$0 \\ 7 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 3 \\ 4 \\ 4 \\ 5 \\ 1 \\ 1 \\ 3 \\ 4 \\ 4 \\ 5 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1$
19         20         21         22         23         24         25         26         27         28         29         30         31	電波測定用同軸管       30         温度測定用同軸管       40         二度測定用同軸管       31         二度測定用同軸管       32         冷却箱写真       33         冷却箱写真(蓋を載せた状態)       33         冷却箱写真(蓋を載せた状態)       34         測定回路の模式図       44         受信機の写真       44         受信機の写真       44         金属可変位相器によって位相のみを変化させた結果       44         金属可変位相器       44         位相変化概念図1       44         位相変化概念図2       44	
19         20         21         22         23         24         25         26         27         28         29         30         31         32	電波測定用同軸管概略図(電波測定用に比べ、熱電対が多い。)3       3         温度測定用同軸管概略図(電波測定用に比べ、熱電対が多い。)3       3         冷却箱写真       3         冷却箱写真(蓋を載せた状態)       3         測定回路の模式図       4         受信機の写真       4         型定機器一式       4         金属可変位相器によって位相のみを変化させた結果       4         位相変化概念図1       4         位相変化概念図2       4         測定回路改良案       4	07789011344566
19         20         21         22         23         24         25         26         27         28         29         30         31         32         33	電波測定用同軸管与具(宕塩を充填済み)       36         温度測定用同軸管概略図(電波測定用に比べ、熱電対が多い。)       37         温度測定用同軸管写真       37         冷却箱写真       37         冷却箱写真(蓋を載せた状態)       38         冷却箱写真(蓋を載せた状態)       39         測定回路の模式図       44         受信機の写真       41         測定機器一式       41         金属可変位相器によって位相のみを変化させた結果       42         金属可変位相器       44         位相変化概念図1       44         位相変化概念図2       44         測定回路改良案       44         個       45         第       46         1       47         1       48         45       44         46       47         47       48         48       49         49       44         41       44         42       44         44       45         45       46         46       47         47       48         48       44         44       44         45       44         46       44         47       44         48	077890113445668
19         20         21         22         23         24         25         26         27         28         29         30         31         32         33         34	電波測定用同軸管概略図 (電波測定用に比べ、熱電対が多い。)       36         温度測定用同軸管写真       37         冷却箱写真       38         冷却箱写真 (蓋を載せた状態)       39         測定回路の模式図       44         受信機の写真       44         型定機器一式       44         金属可変位相器によって位相のみを変化させた結果       44         位相変化概念図1       44         位相変化概念図2       44         1       45         位相変化概念図2       44         1       45         位相変化概念図3       46         1       47         1       48         1       44         1       45         45       46         46       47         1       48         1       49         1       44         1       44         1       44         1       44         1       44         1       44         1       44         1       44         1       44         1       44         1       44         1       44         1       44 <t< td=""><td>0778901134456689</td></t<>	0778901134456689
19         20         21         22         23         24         25         26         27         28         29         30         31         32         33         34         35	電波測定用同軸管概略図(電波測定用に比べ、熱電対が多い。)3       3         温度測定用同軸管概略図(電波測定用に比べ、熱電対が多い。)3       3         冷却箱写真       3         冷却箱写真(蓋を載せた状態)       3         測定回路の模式図       4         受信機の写真       4         型定機器一式       4         強属可変位相器       4         金属可変位相器       4         位相変化概念図1       4         位相変化概念図2       4         位相変化概念図3       4         低音報公員案       4         低音報       4         1       4         1       4         1       4         1       4         4       4         4       4         4       4         4       4         4       4         4       4         4       4         4       4         4       4         4       4         4       4         4       4         4       4         4       4         4       4         4       4         4       4         4       4 </td <td>07789011344566899</td>	07789011344566899
19         20         21         22         23         24         25         26         27         28         29         30         31         32         33         34         35         36	電波測定用同軸管概略図(電波測定用に比べ、熱電対が多い。)       30         温度測定用同軸管概略図(電波測定用に比べ、熱電対が多い。)       31         冷却箱写真       32         冷却箱写真(蓋を載せた状態)       33         測定回路の模式図       44         受信機の写真       44         測定機器一式       44         金属可変位相器によって位相のみを変化させた結果       44         金属可変位相器       44         位相変化概念図1       44         直接波の発生源(一例)       44         位相変化概念図2       44         個家化概念図2       44         原ant4の模式図。       44         日本の様式図。       44         日本の様式図       44         1       50         1       45         1       45         1       46         1       47         1       48         1       44         1       44         1       44         1       44         1       44         1       44         1       44         1       44         1       44         1       44         1       44         1       44         1	077890113445668990

38	全体のジオメトリ53
39	冷却箱上蓋 54
40	スタイロフォーム
41	r 方向の分割
42	z 方向の分割
43	分割中に設定された熱源の例 55
44	表面に設定された熱源 56
45	冷却箱外側の初期温度 57
46	冷却箱内側の初期温度 57
47	熱抵抗薄層158
48	熱抵抗薄層 2
49	波源
50	メッシュ分割の様子 59
51	電波反射シミュレーション
52	熱伝搬シミュレーション 60
53	40mmの同軸管 62
54	60mmの同軸管 62
55	線路長を変えた際の位相変化 62
56	分布定数回路の概念図 64
57	分布定数回路との比較 64
58	氷 (2MeV、1mA) の r=6mm での温度比較 67
59	氷 (2MeV、1mA) の r=9mm での温度比較 67
60	氷 (2MeV、1mA) 位相変化シミュレーション
61	氷 (2MeV、1mA) 反射率シミュレーション 68
62	各種の電流、電圧値に対する、反射電波の強度69
63	岩塩 (2MeV、1mA) の r=6mm での温度比較
64	岩塩 (2MeV、1mA) の r=9mm での温度比較
65	氷 (2MeV、1mA) 位相変化シミュレーション
66	岩塩 (2MeV、2mA) ビーム照射直後の電波反射率測定 72
67	氷 (2MV 0.5mA) 位相変化シミュレーション
68	氷 (2MV 0.5mA) 反射率シミュレーション
69	氷 (2MV 0.75mA) 位相変化シミュレーション
70	氷 (2MV 0.75mA) 反射率シミュレーション
71	氷 (2MeV2mA) の r=6mm での温度比較 80
72	氷 (2MeV2mA) の r=9mm での温度比較 80
73	氷 (2MeV 2mA) 位相変化シミュレーション
74	氷 (2MeV 2mA) 反射率シミュレーション
75	氷 (1.5MeV1mA) の r=6mm での温度比較
76	氷 (1.5MeV1mA) の r=9mm での温度比較
	7
	-

77	氷 (1.5MeV 1mA) 位相変化シミュレーション
78	氷 (1.5MeV 1mA) 反射率シミュレーション
79	氷 (1.5MeV 1.33mA) 位相変化シミュレーション
80	氷 (1.5MeV 1.33mA) 反射率シミュレーション
81	氷 (1MeV 2mA) 位相変化シミュレーション
82	氷 (1MeV 2mA) 反射率シミュレーション
83	氷 (1MeV 1.5mA) 位相変化シミュレーション
84	氷 (1MeV 1.5mA) 反射率シミュレーション
85	氷 (1MeV1mA) の r=6mm での温度比較 87
86	氷 (1MeV1mA) の r=9mm での温度比較 87
87	氷 (1MeV1mA) 位相変化シミュレーション 88
88	氷 (1MeV1mA) 反射率シミュレーション 88
89	国立極地研究所 92
90	低温室間取り
91	入室管理モニター
92	非常時通報ボタン
93	低温室 (-30 ℃) に設置された共振器。左から、500MHz、700MHz、
	1GHz
94	低温室に隣接した、常温の部屋に設置された測定機器類96
95	低温室の一室
96	空気吹き込み方 97
97	空気吹き込み式によって作成された氷
98	低速冷却法
99	低速冷却法によって作成された氷
100	失敗した氷
101	バンドソーを用いた加工の様子
102	多角形に整形された試料100
103	旋盤を用いた加工の様子101
104	ミクロトームを用いた加工の様子
105	ミクロトームによる加工時に破損した試料
106	昇華してしまった試料
107	氷試料保管の様子
108	円盤状に切り出した氷試料 104
109	測定に用いた氷試料105
110	ノギスを用いた寸法測定
111	マイクロメータを用いた寸法測定
112	外気温の器具と接触し融解した試料。
113	共振器に試料を挿入している様子。
114	低温室の温度変化

115	テフロンの誘電率実部108
116	テフロンの誘電正接 $(tan \delta)$
117	WX-20D 同軸管外部導体 電波反射測定用
118	WX-20D 同軸管外部導体 温度測定用
119	同軸管内部導体
120	同軸管冷却箱上面112
121	同軸管冷却箱上蓋113
122	同軸管冷却箱底面
123	同軸管冷却箱側面1115
124	同軸管冷却箱側面2115
125	スペーサー
126	冷却箱上面固定用横板1 116
127	冷却箱上面固定用横板 2
128	冷却箱脚部
129	管接続リング 電波反射測定用119
130	管接続リング 温度測定用120
131	スタイロフォーム
132	電子ビーム受リング122
133	測定装置回路図
134	NI LabVIEW マニュアル p.2
135	NI LabVIEW マニュアル p.3
136	NI LabVIEW マニュアル p.4_1
137	NI LabVIEW マニュアル p.4_2
138	NI LabVIEW マニュアル p.5
139	NI LabVIEW マニュアル p.6
140	NI LabVIEW マニュアル p.7
141	NI LabVIEW マニュアル p.8
142	NI LabVIEW マニュアル p.9
143	NI LabVIEW マニュアル p.10
144	LabVIEW ブロックダイアグラム
145	rsa マニュアル p.2
146	rsa マニュアル p.3
147	rsaマニュアル p.4

# 表目次

1	氷試料の寸法	27
2	岩塩粉末と氷のパラメータ....................	51
3	シミュレーション内容	65

## 1 序論

SND(SaltNeutrinoDetector)実験グループは宇宙から飛来する超高エネルギー ニュートリノを天然に存在する岩塩鉱山や南極氷床などの巨大媒質によって検出 する実験の実現を目指している。この超高エネルギーニュートリノは加速器実験 で得られるエネルギーより遥かに大きなエネルギーで地球に入射する。このため、 超高エネルギーニュートリノと物質との相互作用断面積測定によって、加速器実験 では得られない超高エネルギー領域での素粒子標準モデルの検証を行うことが出 来る。巨大媒質中の超高エネルギーニュートリノ入射現象を検出するために、我々 はレーダー法を提唱している。

本論文の目的は、レーダー法の基礎的な研究として、詳細な電波反射機構解明 のために、電子ビームを用いた電波反射測定実験を行い、その結果をシミュレー ションと比較することである。また、レーダー法の実践においては、少ない数の レーダーによって粒子反応を検出するために、レーダー法に使用する検出媒質は 電波減衰長が長いものが望ましい。このため、岩塩鉱や南極氷床が充分長い電波 減衰長を持つか確認する必要がある。VHF、UHF 領域での氷の電波減衰長を推定 するために、国立極地研究所の低温室を利用し、-30 ℃の環境下において摂動空洞 共振器法によって氷の複素誘電率を測定し、電波減衰長を求め、南極氷床の検出 媒質としての有用性を確認する。

### 1.1 ニュートリノ

ニュートリノは電荷を持たず、非常に小さい質量を持つ中性レプトンである。ま た1/2hのスピンを持っている。ニュートリノには電子ニュートリノ (ve)、ミュー ニュートリノ ( $\nu \mu$ )、タウニュートリノ ( $\nu \tau$ )が存在し、それぞれに反粒子が ある。ニュートリノは弱い相互作用と重力相互作用によってしか他の素粒子と反応 を起こさない。弱い相互作用は非常に近い距離でしか働かず、反応の確率が非常に 小さい。そのため地球程度なら通り抜けてしまう。そのうえニュートリノの質量は 非常に小さいため検出することが難しい。そのため、実験で発見されたのは理論的 に提唱されたよりも20年ほど遅い1956年頃であった。ニュートリノ仮説を提唱 したのは W パウリ (Wolfgang Ernst Pauli)である。原子核のβ崩壊において、β 線である飛び出してくる電子のエネルギーが広くばらつく現象が現れた。エネル ギー保存則によるなら、もし崩壊後の原子核と飛び出してくる電子の2体しかい ないならば、飛び出してくる電子のエネルギーは崩壊前と崩壊後の原子核のエネ ルギーの差に等しくなる、つまり電子のエネルギーは一意に定まり、連続的なばら つきを持つことはありえないことになる。これに対し、ニールス・ボーアは、β崩 壊の過程ではエネルギー保存則が成り立っていないと予測したが、パウリは電荷を 持っていない中性の粒子が核内に存在しエネルギーを持ち去っていると予測した。 つまりβ崩壊は2粒子によるものではなく3粒子によるもので、またそれまでの

研究で見つからなかったのはその粒子が電荷を持っていない中性の粒子であるか らだと考えた。パウリはこの粒子をニュートロンと読んでいたが、この名前は中 性子に付けられてしまった。その後、フェルミ (E.Fermi) が中性子、陽子、電子、 ニュートリノすべて量子場演算子を用いて表し、B 崩壊を記述した。ニュートリ ノ(neutrino)と名付けたのもフェルミである。語尾に「イノ」がつくのはイタリ ア語で、「小さい」という意味である。いくつかの異なった実験がフレデリック・ ライネスとクライド・カワンの2人によって行われ、初めてニュートリノが観測 された。1953年から1959年に行われた、この実験では、原子炉から生じたニュー トリノビームを液体シンチレータに当て、発生した中性子と陽電子を観測するこ とによって、ニュートリノの存在を証明した。低エネルギーのニュートリノに関 する知見は、太陽ニュートリノが、レイモンド・デイビスによって、1967年 から1994年にかけて測定され、予想値よりも3分の1であることの指摘がな された。国内におけるニュートリノ研究としては、Kamioka 実験において、大マ ゼラン星雲で発生した超新星爆発由来のニュートリノが検出され、superKamioka 実験においては、大気ニュートリノの観測によってニュートリノ振動が発見され ている。また KamLAND 実験においては反ニュートリノ観測研究が進んでいる。

## 1.2 超高エネルギーニュートリノ

超高エネルギー宇宙線 (UHE 宇宙線) は活動銀河核(AGN)、ガンマ線バース ト(GRB)等から発生すると理論的に予測されている。宇宙線は最高エネルギー 10<sup>19</sup>eV 以上が飛来している。この UHE 宇宙線(陽子)が宇宙空間を充たす 2.7K の宇宙マイクロ波背景輻射(CMB)と衝突し、核子共鳴を生成する。それがπ中 間子に崩壊し、π中間子が更に崩壊し、UHE νを生成する。この過程はGZK 効果 [1] と呼ばれ、生成した UHE vは GZK vと呼ばれる。GZK 過程は本来、宇宙線 の最高エネルギーを制限する理論であるが、Berezinsky と Zatsepin によって、こ の過程から GZK vが発生することが予言された。核子共鳴の生成閾値エネルギー を越える UHE 陽子と CMB が存在することは明らかになっているので、GZK v が存在する可能性は高い[2]。宇宙空間はCMBで充たされている。UHE 陽子の伝 播距離は GZK 過程でエネルギーを失うので 2 千万光年程度と短くなる。UHE 光 子も CMB 等との衝突でエネルギーを失い1億光年程度の伝播距離となる。一方、 UHE vは CMB との衝突断面積が小さいので宇宙の果て(130 億光年程度)の遠 方(宇宙初期)までの超高エネルギー状態の情報を直接与えてくれる。天然に存 在する岩塩や南極氷床等の巨大媒質を利用しレーダー法によって入射粒子を検出 する SND 実験 (章 1.7 を参照) は通常の加速器においては到達することが困難な超 高エネルギーニュートリノ (10<sup>16</sup>eV ~10<sup>20</sup>eV) を捉えることを目的としている。超 高エネルギーニュートリノを検出することによって、通常の加速器実験では得ら れない領域の物理的現象の理解につながる。

## 1.3 活動銀河核(AGN)

銀河の中には、中心部の小さな領域が銀河全体の1万倍ほどに明るく輝いている ものがある。この明るく輝く銀河中心部の天体を活動銀河核、AGN(Active Galactic Nuclei)と呼ぶ。クエーサーも AGN の一種である。銀河核の中心に大質量のブ ラックホールが存在し、ブラックホールに物質が落ち込む際に放出されるエネル ギーが AGN の輝きの源となっているとする説が一般的である。活動銀河核からは ほぼ全ての波長の電磁波(電波から可視光、X線、γ線)が放射されているが、中 には宇宙ジェットと呼ばれるような、数千光年に及ぶ光速に近い速度の物質の放出 などの大規模な現象を伴っている。

## 1.4 ガンマ線バースト (GRB)

ガンマ線バーストは数秒から数十秒の間に膨大なエネルギーがγ線領域を中心 とする電磁波で放出される現象である。もっとも明るいガンマ線バーストにおい ては 50-300keV の光子数は 100 個 cm<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> にも達する。この現象は 1968 年にヴェ ラ衛星 (アメリカ、本来は核実験監視用) によって偶然発見されて以来、2000 を超 えるガンマ線バーストが観測され、またその発生場所が全天に一様に分布するこ とが解っている。1997年には、ベッポサックス衛星(イタリア、オランダ)は、γ 線バーストモニターと広視野X線カメラをもとに、初めてガンマ線バーストの発 生源を確定することに成功した。ノルディック光学望遠鏡(ラ・パルマ天文台に設 置)による観測で、発生源とみられる天体の赤方偏移が図られ、ガンマ線バース トの発生が、70-100億光年も地球から離れた天体であることが判明した。これほ ど遠方を発生源とするにもかかわらず、大きなエネルギーが到達するということ は、ガンマ線バーストが如何に強力な爆発現象であるかということを意味してい る。また、もし発生源から等方的にエネルギーが放出されていると仮定すると、そ のエネルギーは膨大な物となってしまう。このため、発生源からはジェット状にエ ネルギーが放出されていることが予測される。ジェットの方向が偶然地球方向を向 いたものだけが観測されているため、現実にはより高い頻度でこの現象が起きて いることが予測される。また、発生源としては諸説あり、定かではないが、中性 子星の合体によるとする説が有力である。

## 1.5 GZK カットオフ

GZK 限界(Greisen-Zatsepin-Kuzmin limit)GZK カットオフ (GZK cutoff)と は 4× 10<sup>19</sup> eV 以上の宇宙線 (主に陽子) は光子との衝突によってエネルギーが減り 1.5 億光年程度の間に 4× 10<sup>19</sup> eV 以下になる現象のことである。 4× 10<sup>19</sup> eV 以上の宇宙線は宇宙背景輻射と  $\Delta^+$  共鳴を起こす。

$$p + \gamma \to \Delta^+ \to n + \pi^+$$
 (1)

 $\Delta^+$  共鳴は強い相互作用によって $n + \pi^+$  か $p + \pi^0$  に崩壊する。このプロセス によるエネルギー損失によって、宇宙線のエネルギーが制限される。また、二次 粒子の崩壊によって、超高エネルギーニュートリノが生成される。[5] この過程は Berezinsky-Zatsepin によって予言された。

$$n \rightarrow p + e^- + \overline{\nu_e}$$
 (2)

$$\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu \tag{3}$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \nu_\mu \tag{4}$$

アルゼンチンのオージェ、エアシャワー観測によって GZK カットオフの存在が 確認され、これにより Berezinsky-Zatsepin ニュートリノの存在可能性が高まった。 また、近年、南極のアムンゼン・スコット基地に設置された IceCube 実験によっ て、2イベントの超高エネルギーニュートリノ (PeV 以上) が検出された。しかし ながら、もし、このニュートリノが GZK ニュートリノであるとすると装置の性能 に対して、この頻度は理論から予測される頻度より高く、GZK 過程以外の過程を 発生源としている可能性がある [3][4]。

# Gurgen Ashotovich Askar 'yanの提案による超高エネル ギーニュートリノ検出器の研究

1964年にモスクワの Lebedev 研究所のアルメニア人、Gurgen Ashotovich Askar' yan によって、干渉チェレンコフ効果による超高エネルギーニュートリノ検出器 の検出媒質として、電波に対する透明度が良い岩塩、月面土壌、氷などの固体媒 質を使用することが提案された [6]。また、Askar'yan は音波を用いた検出方法を 提案した。電波受信機では光量子1個を検出することは出来ないが、固体媒質中 のように、電磁シャワーの規模が空気中よりも小さくなる環境ならば、カスケー ドシャワーの荷電粒子間距離が電波波長よりも十分短くなり、位相が揃うことで 干渉増幅作用が起こり、カスケードシャワーエネルギーの2乗に比例する放射強 度が得られる。その結果、超高エネルギーニュートリノが入射した場合、検出可 能な強度の電波放射が得られる。この効果はハワイ大学の P.Gorham らの研究グ ループにより実験的に確認された [7]。しかしながら、この電波を捉えて超高エネ ルギーニュートリノを観測するには、電波減衰長程度の間隔でアンテナを設置せ ねばならず、井戸を掘削する費用が膨大となってしまう。



図 1: アスカラヤン効果の概略図

## 1.7 レーダー法(電波反射)によるニュートリノ検出器の研究

超高エネルギーニュートリノが岩塩鉱や南極氷床などの検出媒質に入射するこ とにより、電磁、ハドロンシャワーが発生し、電離電子が発生する。そのことによ り温度の局所的な上昇が起こり、誘電率、屈折率の局所的な変化が起こる。このた め超高エネルギーニュートリノの入射を電波反射率の変化(10-6程度)として観測 することが可能になる。一般に媒質中に受信機を設置するためには多くのアンテ ナを挿入する採掘井戸を密に用意する必要があるが、井戸の掘削は一般に高価で ある。レーダー法においては、常時レーダー波を検出媒質中に照射する必要がある が、アスカラヤン法によって発生する電波よりも遥かに大きな強度の人工的な電 波を発生させることが可能なため、媒質中の減衰率と低い電波反射率 (10<sup>-6</sup>) など の制限に対しても対応することが可能である [8][9]。また、もし媒質中で電波減衰 長の長い波長を利用することが出来れば、アスカラヤン法よりもアンテナの設置 間隔を疎らにすることが可能で、電波減衰長は、岩塩の場合、低い周波数(50MH z)に対し1km ほどであり[10][11]、氷に対しては1GHz以下で1km ほどの減衰 長を持っている。アンテナとニュートリノの入射位置の距離が往復で6減衰長程な らば検出することが可能である。またレーダーのアンテナの設置に関しても、す でに採掘の進む商業用岩塩鉱の掘削空間の底部に設置するだけで良い。そのため、 アスカラヤン法にくらべ、費用を抑えることが可能になる。図2に岩塩鉱山を用 いたレーダー法の概図を載せる。

## 2 レーダー法の検出媒質

レーダー法における検出媒質には岩塩鉱山と南極氷床などが候補に挙がる[10]。 岩塩鉱は2億5千万年程前のジュラ紀にパンゲア大陸内の閉鎖された海水が蒸発 して地中に埋没して生成されたとされている。その後、岩塩の密度は2.2g/cm<sup>3</sup>と 他の岩石密度 2.7g/cm<sup>3</sup> より低いため、浮力により地下 10-20km に堆積した岩塩層 から上部岩石の弱い筋に沿って地下 200m 程まで上昇する。生成した直径 3km 程 度の円筒状の形状は岩塩ドームと呼ばれる。このドームの生成当時、日本は海中 にあったため、岩塩鉱が生成される環境ではなかった。そのため日本には存在し ない。ヨーロッパ北部やメキシコ湾岸のテキサス州、ルイジアナ州には電波減衰 長の長い岩塩ドームが豊富(約300個)に存在する。岩塩ドーム内部は放射性廃 棄物の貯蔵、石油、天然ガスの貯蔵、あるいは圧縮空気貯蔵による昼間発電など に利用されている。岩塩鉱を用いる利点としては、気体や液体の透過性が無いの で、岩塩外部の地下水は外部の岩塩を溶かすのみで内部まで侵入することは出来 ない。この性質のため、石油が移動後に堰き止められ濃縮されるため、石油の採 掘が可能である。また、電波の吸収の多い水が含まれないことは電波減衰長を長 くし岩塩を検出媒質として用いる際都合が良くなる。また、可塑性が高いので割 れ目は直ぐに閉じる。さらに岩塩ドームの上部は土壌で覆われていて、地上の電 波の進入が防がれているので、内部は電波にとっては完全なシールド箱となって いる。高エネルギーミュー粒子は地中に侵入するが、電波波長よりも十分短い距 離の中に多数の荷電粒子が集中する反応を起こす可能性は低いと考えられる。南 極氷床は岩塩鉱と異なり、電波に対しシールドされていない。そのため木星、銀 河からの電波や、人工電波のノイズがある、また塩の密度が2.2 に対し、氷の密度 は 0.9 である。そのため、岩塩よりも大きい 3×3×7km<sup>3</sup> ほどの体積が必要にな る。そのかわり、岩塩は 100MHz の電波に対し 100m ほどの減衰長しか持たない が [10] [11] 、南極氷床は 300M~1GHz の電波に対し 1km 以上の減衰長を持つ。



図 2: 岩塩鉱山

## 2.1 V·UHF帯における低損失誘電材料の複素誘電率測定

誘電体の複素誘電率  $\varepsilon$  を測定する方法は、その周波数と損失係数  $\tan \delta = \varepsilon''/\varepsilon'$  に応じて、様々な測定方法が存在している [12](図 3 参照)。

しかしながら、V・UHF帯 (30-900MHz) における低損失材料 ( $\tan \delta = \varepsilon'' / \varepsilon'$  が 小さい、岩塩や氷などを含む)の複素誘電率測定法は、図3の赤色の領域に示さ れるように、他の領域と比較して不十分である[13]。空洞共振器は図 2.3 に示す様 な円筒の共振器である。実際に用いた空洞共振器の写真は付録 A.3.2 中の図 93 に 載せる。空洞共振器法は一般に、空洞共振器の高さLが直径Dに比して小さくな ると測定誤差が大きくなってしまう。このため、測定誤差を小さくするためには 測定する試料を細長く作製することが必要になる。しかし、岩塩、氷などの試料 は脆く、壊れやすいため、細長い形状に正確な寸法で加工することは難しく、ま た、V・UHF帯の共振器の直径Dは、その周波数に応じて大型化するため、共振 器の高さLもあまり大きくはできない。従って、挿入孔を閉鎖可能な機構を持つ 空胴共振器が、精密な複素誘電率測定に必要不可欠と言える。我々の研究チーム では今までに、V・UHF 周波数帯の 200MHz、300MHz、500MHz、700MHz、1 GHz に対応した、試料挿入孔封鎖型摂動共振器を開発してきた。この摂動空洞共 振器は、挿入孔を、試料を挟む電極によって塞ぐことで、共振状態を保ち、電場 の漏れを小さくしたもので、これによって、従来以上に高精度な複素誘電率の測 定を可能としている。摂動空洞共振器法の原理は共振器中に試料挿入時と、非挿 入時におけるQ値の変化から誘電率を測定する方法である。詳細な原理について は、次章で紹介する。



図 3: 各種の誘電率測定法

## 2.2 摂動空洞共振器法

摂動空洞共振器法の原理を説明する。試料挿入前後の共振器の等価回路を図4、 図5に示す。



図 4: 試料挿入前

#### 図 5: 試料挿入後

これらの回路のパラメータの値は以下の式(5)(6)によって表される[16]。

$$\begin{array}{l}
C_{0} = \frac{\varepsilon_{0}S}{d} \\
f_{0} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{0}C_{0}}} \\
Q_{0} = \frac{\omega_{0}C_{0}}{G_{0}} \\
W_{0} = \frac{L_{0}I^{2}}{2} + \frac{C_{0}V^{2}}{2}
\end{array}$$

$$\begin{array}{l}
C = C_{0} + \Delta C = \varepsilon \frac{\varepsilon_{0}S}{d} \\
\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' \\
f = f_{0} + \Delta f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{0}C}} \\
Q = \frac{\omega C}{G_{0}} \\
W = W_{0} + \Delta W = L_{0}I^{2}/2 + CV^{2}/2
\end{array}$$

$$(5)$$

f において、 $C \gg \Delta C$ の近似を用いると、試料挿入後の共振周波数は以下の変形 (式 (7)(8)(9))が可能である。

$$f = \frac{1}{2} \frac{1}{\pi \sqrt{L_0 C}} = \frac{1}{2} \frac{1}{\pi \sqrt{L_0 C_0}} (1 + \frac{C_0}{\Delta C})^{\frac{-1}{2}}$$
(7)

$$\sim f_0(1 - \frac{\Delta C}{2C_0}) \tag{8}$$

$$\therefore -\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{(f-f_0)}{f_0} = \frac{\Delta C}{2C_0}$$
 (9)

これによって、 $\Delta f \ge \Delta C$ の関係が得られる。 また、式(5)と式(6)から

$$\frac{1}{2}L_0 I^2 \sim \frac{1}{2}CV^2 \quad \therefore W_0 = CV^2 \tag{10}$$

$$\Delta W = \frac{1}{2} \Delta C V^2 \quad \therefore \frac{\Delta W}{W_0} = \frac{\Delta C}{2C_0} \tag{11}$$

の関係が得られる。これを式(9)に代入することで、

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{\Delta W}{W_0} \tag{12}$$

となる。この関係式が、摂動公式の原理的な関係式である。

2.3 円筒空洞共振器における摂動公式



図 6: 共振器における座標



図 7: 共振器内部に電場と磁場の分布

試料の挿入によって、共振器の中心部の電場が  $E = E_0$ から  $E = (1 + \Delta \epsilon)E_0$ に変わったとする。 もし、電場が sin や cos の様な周期関数に従い、磁場が一定の直流磁場である場合、 エネルギーの変化量 ΔW は電場と磁場によって、式 (12) 以外にも以下の形で表す ことが出来る。

$$\Delta W = \left(\frac{\varepsilon E_0 E^*}{2}\right) \tag{13}$$

$$\frac{\Delta f}{f_0} = -\frac{\Delta \varepsilon E_0 E^*}{W_0} \tag{14}$$

共振器内部の電場 Ezのr方向の分布の様子は以下のように式(15)で表される。

$$E_z = \frac{\chi_{mn}}{d} J_m \left\{ \chi_{mn} \frac{r}{d} \right\}$$
(15)

共振モードの添字は $TM_{mns} \iff TM_{\theta rz}$ で対応する。  $\chi_{mn}$ はm次ベッセル関数 $J_m$ におけるn番目の根。dは共振器の半径。m = s = 0

以下の ν 次のベッセル関数 Z<sub>r</sub> に関する公式を用いて

$$\int r Z_{\nu}^{2}(kr) dr = \frac{r^{2}}{2} (Z_{\nu}^{2}(kr) - Z_{\nu-1}(kr) Z_{\nu+1}(kr))$$
(16)

$$W_0 = \int_0^d \varepsilon_0 \frac{E^2}{2} 2r\pi dr = \pi \frac{\chi_{01}^2}{a} J_1^2 \{\chi_{01}\} \times \frac{Ld^2}{2a^2}$$
(17)

式(12)より電気エネルギの変化量 ΔW は、挿入した試料の半径を a として

$$\Delta W = \int_0^a \Delta \varepsilon \frac{E^2}{2} dr \tag{18}$$

$$= (\varepsilon - 1)\pi \frac{\chi_{0n}^2}{a} \times \frac{La^2}{2a^2}$$
(19)

$$a \ll d \qquad \int_0^a J_0^2 \left\{ \chi_{0n} \frac{r}{d} \right\} \sim 1 \tag{20}$$

摂動公式に式(19)(20)を代入すると、円筒空洞共振器の摂動公式となる。

$$-\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\varepsilon_r - 1}{2J_n^2 \left\{\chi_{0n}\right\}} \left\{\frac{a}{d}\right\}^2 = \alpha_n(\varepsilon_r - 1) \left\{\frac{a}{d}\right\}^2 \tag{21}$$

ここで

$$\alpha_n = \frac{1}{2J_1^2 \{\chi_{0n}\}} \tag{22}$$

$$\Delta f = f - f_0 \tag{23}$$

$$f = f(1 + i\frac{1}{2}(\frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_0}))$$
(24)

共振器全体の体積をVとし、試料の体積を $\Delta V$ としたとき、その比率 $\Delta V/V$ を 体積充填率と呼ぶ。いま、試料と共振器の高さが等しいので、

$$\frac{\Delta V}{V} = \left(\frac{a^2 L}{d^2 L}\right) \tag{25}$$

が言えて、式 (21) に式 (22) (24) (25) を代入し、実部と虚部で整理すると以下 のようになる。

$$\frac{-(f-f_0)}{f} = \alpha_n(\varepsilon'-1)\left\{\frac{a}{d}\right\}^2 = \alpha_n(\varepsilon'-1)\frac{\Delta V}{V}$$
(26)

$$\frac{1}{2}\left(\left(\frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_0}\right)\right) = \alpha_n \varepsilon'' \left(\frac{a}{d}\right)^2$$
$$= \alpha_n \varepsilon'' \frac{\Delta V}{V}$$
(27)

実部 (式 (27)) は共振周波数の変化、虚部 (式 (27)) は Q 値の変化である。共振器の 中心のような、円筒空洞共振器の電場のみ存在する場所においては、共振器に試 料を挿入することで起こる、Q 値の変化に対して、摂動公式が成立する。また、 $\alpha_n$ は電場のモードと試料の形状によって決定される摂動公式の比例定数で、 $TM_{010}$ モードの共振器では約 1.855 である。具体的な導出に関しては付録 A.2 を参照され たい [14][15]。

また、ここでいうQ値は試料挿入によって、周波数の変化が小さい場合には以下 の式が成り立ち、

$$Q = \frac{f}{\delta f} \tag{28}$$

共振カーブの半値幅 $\delta f$ でQを表すことが出来る。この理由により、共振周波数とQ値の試料挿入による変化を測定することで誘電率 $\varepsilon$ を求めることが出来る。



## 2.4 誘電の原理

電場中に物質が置かれた際に、電荷の分布に偏りを生じる物質を誘電体と呼び、 この現象を分極と呼ぶ。誘電体の持つ分極には、いくつかのメカニズムがあり、そ れらメカニズムの総合として、物質全体としてみた時の性質としての誘電率を持 つようになる。

#### 電子分極と原子分極

電子分極とは、誘電体に電場を印加することで物質中の電子雲が原子核に対して 移動し、微小振動が起こることを指す。原子分極も電子分極と同様に正負のイオ ンが微小振動することによって起こる。電子分極と原子分極は常に *ε*' にごくわず かしか寄与せず、定量的には殆ど損失を与えない。

#### 配向(双極子)分極

分子内の正電荷と負電荷の重心が一致していない分子を極性分子と呼び、一例と しては水 ( $H_20$ )、塩化水素 (HCL)、アンモニア ( $NH_3$ )などが該当する。これらの 極性分子は、電気双極子としての性質を持つことになり、電気双極子モーメント を持つ。このような極性分子に電場が印加された場合、電気双極子に対してトル クが生じ、電気双極子が回転して電場と平行となることで、分極が発生する。こ のような分極を、配向分極、あるいは双極子分極と呼ぶ。もし、電場が変化して、 配向が変わると分子のトルクも変化するため、双極子が回転を起こす。この効果 によって、誘電率実部  $\varepsilon$ と誘電率虚部  $\varepsilon$ 'の両方が緩和周波数 (図 11 参照、誘電率 実部  $\varepsilon$  と誘電率虚部  $\varepsilon$ 'が急変する点)で変化する。この効果は、分子振動は電子や イオンの振動よりも遅い為、UHF 帯においてのみ、影響を発揮する。





図 8: 原子分極

図 9: 電子分極



図 10: 配向(双極子)分極の概念図



図 11: 誘電率の周波数依存性

### 2.5 誘電率からの電波減衰長の導出

レーダー法において想定される岩塩及び氷の電波減衰長を誘電率から導出する方法を説明する。

式 (29) で表される電場の振幅 E<sub>0</sub> が <sup>1</sup>/<sub>e</sub> となる距離のことを電波減衰長と呼ぶ。

$$E_0 = E_0 \exp^{-ikz} \tag{29}$$

また、以下の過程、式 (30) によって、

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_0}\sqrt{\varepsilon} = \frac{2\pi}{\lambda_0}\sqrt{\varepsilon_0\varepsilon'(1 - \mathrm{itan}\delta)}$$
(30)

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r = \varepsilon_0 (\varepsilon' - i\varepsilon'') \tag{31}$$

波数 k は複素誘電率式 (31) に依存した量である。

損失係数として、 $\tan \delta = \varepsilon'' / \varepsilon'$ とし、 $\exp^{-ikz} = \frac{1}{e} \varepsilon$ 成立させるような z は

$$L_{\alpha} = \frac{\lambda}{\pi \sqrt{\varepsilon'} \tan \delta} \tag{32}$$

であり、これが電波減衰長  $L_{\alpha}$  である。 この関係式 (32) を用いて、測定した試料の誘電率から、検出媒質の電波減衰長を 求めることが出来る。

## 2.6 低温室における氷の誘電率測定

岩塩の測定は常温環境下において可能だが、氷の測定においては、試料の融解 を防ぐために、試料作製ならびに測定などの一連の作業は、国立極地研究所低温 環境実験室において行われた。低温室には極地研はその用途に応じて複数の低温 室(0℃から-50℃)までがある。我々の作業においては、試料作製、試料加工は 主に-10℃の低温室、測定作業は-30℃の低温室で行われた。また、作成した試料 の保存なども、-30℃の部屋で行った。共振器を除く、測定装置(電子機器類)は 低温室からケーブルを引き、隣接する常温の部屋に設置した。極地研究所の施設 紹介、測定試料の作成、測定などの過程の詳細は付録 A.3 に記載した。

## **2.7** 氷の電波減衰長

今回測定を行った結果として、図12に500MHz、図13に1GHzにおける氷の電 波減衰長のヒストグラムをガウス関数でフィットした結果を載せる。また、図14 に今回測定した、氷の減衰長の周波数特性を載せた。図示した点は、500MHzと 1GHzの測定点で、700MHzの測定点は含まれていない。これらの測定結果は1つ の試料を複数回測定した結果を含んでいる。表1に測定した試料の寸法を載せる。 直径は、両端と中央の三箇所で測定している。直径2が中央の直径、直径1,3が両 端の直径である。

資料番号	周波数	長さ (mm)	直径1(mm)	直径 2(mm)	直径 3(mm)
NO.1	1GHz	30.16	7.065	7.081	7.042
NO.2	1GHz	30.50	7.348	7.259	7.293
NO.3	1GHz	30.35	5.766	5.929	5.930
NO.4	1GHz	30.50	7.348	7.259	7.293
NO.5	1GHz	30.46	8.375	8.397	8.399
NO.1	500MHz	100.13	22.161	22.146	22.107
NO.2	500MHz	100,32	17.464	17.416	17.371
NO.3	500MHz	100.18	13.167	13.109	13.248
NO.4	500MHz	100.35	11.888	11.839	12.009
NO.5	500MHz	100.40	13.382	13.370	13.434
NO.5	500MHz	100.31	18.101	18.075	18.088

表 1: 氷試料の寸法

測定結果にはばらつきが見られるが、この原因としては試料の品質、測定時の 室温、試料の設置位置が共振器の中心からずれていること等の影響が考えられる。 また、図 12、図 13 中の χ 二乗検定 (χ<sup>2</sup> /ndf) の値が小さいが、この理由として は、エントリ数 (測定回数)が少ないのため各 bin の誤差が適切に設定されていな い事が原因と考えられる。測定回数が少ない理由としては低温室の温度変化が挙 げられる。低温室は冷却装置の都合上、1 日に約 3 回、温度が 5 ℃ほど上昇する。 測定は、測定結果に悪影響を与えないよう、室温が安定した時間帯を見計らって 作業を行う必要がある。この為、作業を行える時間が制限され、測定回数が少な くなっている。詳細は付録 A.3 を参照されたい。また、図 14 中の線は他の実験か らの推定値で、デバイ分布と格子振動の効果を考慮したモデルによって式を作り、 最大 100MHz までの低周波数帯の測定結果と 150MHz から 2.7GHz の周波数帯で の測定結果をフィットした直線である [17][18][19]。

これらの測定結果より氷は500MHzと1GHzのいずれの周波数においても1km近 い電波減衰長を持つことが分かる。レーダー法の実践においては、媒質が十分長 い電波減衰長を持つ必要が有るため、レーダー法の実現性に対し肯定的な知見が 得られた。ただし、測定結果は測定試料の結晶軸方向の影響を受ける。今回の測 定においては氷試料の結晶軸をそろえて測定していないため、その影響の可能性 がある。



図 12: 500MHz における電波減衰長



図 13: 1GHz における電波減衰長



氷の電波減衰長

図 14: 電波減衰長の周波数特性(氷)

## 3 電子ビーム照射実験による電波反射測定

岩塩鉱、南極氷床内部の超高エネルギーニュートリノ反応を模し、電波反射機構 を解明するために岩塩または氷充填同軸管の開放端面に1,1.5,2.0 MeV の電子ビー ムを各種の電流で60 秒間照射し、435MHz の送信波を同軸管へ送り電子ビーム照 射時における反射波を測定した。反射率が10<sup>-6</sup>と微小な為、零位法を採用した。 反射波は、振幅変化、および位相変化を測定した。また、反射電波測定の実験と 平行して、ビーム照射による同軸管の温度変化の測定を温度測定専用の同軸管を 用意して行っている。

## 3.1 電子ビーム加速器

実験には日本原子力研究開発機構、高崎量子応用研究所の1号加速器を用いた (図15 [23])。電源部、高電圧発生回路、高電圧切り替え装置、垂直用、水平用の2 式加速管、スキャンニング部と付属装置で構成される。直流電圧はバランス型コッ ククロフト・ウォルトン回路で発生され、SF6 ガスで絶縁される。

ー号加速器の最大の特徴は、1式の高電圧発生部で垂直、水平両方向にビーム を取り出せる、デュアルビーム式であることで、このため、垂直ビーム用、水平 ビーム用の2つの照射室でそれぞれ独立に照射実験を行うことができる。また、垂 直ビーム使用中に、水平ビーム室で実験の準備を行う事ができる。高電圧は整流 器とコンデンサーを12段組み合わせたコッククロフト・ワルトン型回路で発生さ れ、その高電圧を高電圧切り替え装置を用いて、垂直、水平方向に切り替える。

垂直ビームは、廃水処理、プラスチックの改善、キュアリング、汚泥処理、半導体の照射効率の研究に利用され、水平ビームは排煙処理、複合材料の劣化試験、X 線ターゲットの開発、線量測定技術の開発などに利用されている。

装置の仕様性能

- 加速電圧:0.5~2.0 MV (0.5MV 間隔で)可変
- ビーム電流:0.1~30 mA 連続可変ただし、加速電圧 0.8 MV 以下では最大 ビーム電流は加速電圧とともに徐々に減少し、0.5MV では 10mA。
- 定格出力:60kW
- 加速電圧安定度:± 40kV(0.5~2.0MVの範囲で設定値の± 2%以内)
- ビーム安定度:3mA 未満 ± 15 μ A 以内、3~30mA ± 300 μ A 以内(設定 値の± 2%以内目標値)

	( (一階) 垂直ビーム 最大 120cm
走查幅	(二階) 水平ビーム 最大 60cm
	ビーム分布均一度 ± 5 %以内(窓下 15cm)
	( (一階) 垂直 60 °(120cm に対し)
土木缶亩	(二階) 水平 40° (60cm に対し)
<b>疋</b> 且円反く	走查周波数 200Hz
	連続運転:両方向とも連続自動制御運転が可能
走查角度〈	<ul> <li>(一階) 垂直 60°(120cm に対し)</li> <li>(二階) 水平 40°(60cm に対し)</li> <li>走査周波数 200Hz</li> <li>連続運転:両方向とも連続自動制御運転が可能</li> </ul>



図 15: 高崎量子応用研究所1号加速器棟模型



図 16: 垂直ビーム照射装置



図 17: ビームプロファイル

## **3.2** 実験装置の概要

検出媒質の温度上昇による電波反射を測定するために、検出媒質の候補となる岩 塩、あるいは氷を充填した同軸管の開放端面に電子ビームを 60 秒間照射し、ビー ム照射中の温度上昇時と、ビーム照射後の温度降下時の電波反射 (振幅変化と位相 変化)を測定した。ビーム照射時間を 60 秒とした理由は複数ある。第一にビーム による温度上昇が平衡状態になる時間がおおよそ 60 秒であること、第二にビーム の照射時間を節約するためである。ビーム照射前に加速器の電流電圧を増加させ るプロセスなど、一回の照射あたりに固定のロスとなるプロセスがあるため、も し照射時間を短く設定してしまうと、ビームの使用時間の多くを無駄にしてしま うためである。これらの測定は1号加速器の垂直ビームを用いて行われた。同軸 管に氷を充填した際には、試料の融解を防ぐため、ドライアイスを充填した冷却 箱を用いる。冷却箱は照射装置に対して同軸管の位置を決める役割もあり、岩塩 充填時には空のまま、同軸管を設置して用いる。なお、氷の充填に当っては、同 軸管に純水を注入し、ドライアイスで冷却して、氷としている。

#### 3.2.1 同軸管

同軸管は2種類あり、電波反射測定用と温度測定用がある。以前の用いていた 導波管と比較して、同軸管は小型であるため冷却が容易であり、従来は行えなかっ た氷を媒質とした実験が可能である。また、同軸管での実験は分布定数回路によ る計算との比較が容易であり、実験結果の考察に役立つ。電波反射測定用の概略 図を図18、写真を図19に載せる。また、温度測定用の概略図を図20、写真を図 21に載せる。両者に共通する項目を記す。

外部導体の寸法

- 銅 WX-20D(EIAJ 形式\_\_WX 規格)
- 外径 22.22mm
- 内径 19.95mm
- 長さ 100mm

内部導体の寸法

- 真鍮
- 外径 4.49mm
- 長さ 90mm

アルメルクロメル熱電対を同軸管に取り付けることでビーム照射時による温度 変化を測定できる事は共通だが、温度測定用は電波反射測定用よりも熱電対の数 が多い為、より詳細な温度変化を測定できる。熱電対の設置位置の概略図につい ては、電波反射測定用は図 18、温度測定用は図 20 に載せた。レーダー法において は、媒質の温度変化による誘電率の変化が重要であるので、従来よりも詳細な温 度測定を行った。両者を共用化しなかったのは、同軸管内に挿入した熱電対によ り、電波反射測定に悪影響を及ぼすためである。このため、同一の電子ビームの 条件に対して、4 種類(電波測定時の振幅変化、位相変化。温度測定時の振幅変 化、位相変化)の測定を行っている。

### 熱電対の位置

電波反射測定用

- 外部導体の外から測って内側1mmの位置に開放端面から2mm、7mm、10mm
- 外部導体、外壁に開放端面から 30mm の位置

合計4本の熱電対

温度測定用

- 外部導体の外から測って内側1mmの位置に開放端面から2mm、7mm、10mm
- 外部導体の外から測って内側 4mm の位置に開放端面から 2mm、7mm、10mm
- 外部導体、外壁に開放端面から 30mm の位置

合計7本の熱電対

また、この同軸管は岩塩粉末、氷を充填したときにほぼ 50 Ωにインピーダンス 整合するように内径と外径が決められている。

同軸管のインピーダンス  $Z_{in}$  は、同軸管の内部導体外径をa、外部導体内径をbとして

$$z_{in} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}} \log \frac{b}{a}$$
(33)

$$\mu_0 \approx 4\pi \times 10^{-7} \mathrm{H/m} \tag{34}$$

$$\varepsilon_0 \approx 8.85 \times 10^{-12} \mathrm{F/m}$$
 (35)

で与えられる。

例えば氷の屈折率を [20]

$$n = 0.000260T + 1.786 \tag{36}$$

$$n = \sqrt{\varepsilon_r} \tag{37}$$

(38)

とし、温度を T=0( $^{\circ}$ )としたときの同軸管のインピーダンス  $Z_{in}$  は

$$a = 4.49mm \tag{39}$$

$$b = 19.95mm \tag{40}$$

$$\varepsilon_r = 3.188 \tag{41}$$

より

$$z_{in} = 50.11$$
 (42)

となる。



図 18: 電波測定用同軸管概略図



図 19: 電波測定用同軸管写真(岩塩を充填済み)


図 20: 温度測定用同軸管概略図 (電波測定用に比べ、熱電対が多い。)



図 21: 温度測定用同軸管写真

## 3.2.2 冷却箱

冷却箱は同軸管に氷を充填する際、ドライアイスを詰めるためのアルミ製の箱 である。図 22 に冷却箱の写真を示す。写真からわかるように、この中央に同軸管 をはめ込んで使用する。ビーム照射時には中央に穴の開いた蓋をする。また、ビー ム照射時の同軸管の位置決めにも用いられる。冷却箱の上蓋はスタイロフォーム を挟んだ二枚のアルミ板からできていて、同軸管は上蓋に設けられた穴に 5mm ほ ど先端が埋まった状態で固定される。寸法は縦横 30cm、高さ 10cm。四本のアク リル、または金属製の足を持つ。ドライアイスで冷却する際は、熱損失を少なく するために、アクリル製の足を使用する。足を含めた全体の様子は図 23 の写真を 参照されたい。熱損失を少なくするために四方をスタイロフォームで覆っている。 また側面にガス抜き用の穴を持つ。これはビーム照射時の急激な温度上昇により ドライアイスが昇華するため、このガスを抜くために設けられている。



図 22: 冷却箱写真



図 23: 冷却箱写真 (蓋を載せた状態)

#### 3.2.3 測定回路

実験に用いた回路、測定手法について説明する。図24に測定回路の模式図を示 す。この回路によって2通りの測定を行った。一つは振幅零位法による振幅測定 で、もう一方は零追尾法による位相測定である。まず、振幅測定について説明す る。まず、発振器から435MHzの信号が発生し、分配器で2つに分けられる。一方 の信号 *d* はサーキュレータを通じ同軸管に入り、反射波 *b* として結合器に戻ってく る。もう一方の信号は可変減衰器 (mini circuit ZX73-2500-s) と可変移相器 (mini circuit JSPHS-446) を通じ参照波  $\vec{d}$  として結合器で合成される  $(\vec{b} + \vec{d} = \vec{c})$ 。ビー ム照射前に $\vec{d}$ を可変減衰器と可変移相器で $\vec{b}$ と振幅を等しく、位相を $\pi$ ずらすこ とによりビーム照射前に零出力 (ご=0)となるようにする。このことにより、微小 (10<sup>-6</sup>)な変化量を測定できるようにする。これを零位法と呼ぶ。この後に、ビー ム照射を行い振幅の変化を検波器およびスペクトラム・アナライザで測定する。こ れが振幅零位法による振幅測定である。次に位相追尾法による位相測定について 説明する。ビーム照射前に零出力とするところは振幅零位法と同様だが、ビーム 照射中も零出力 (*č*=0) を保ち続ける様に、可変移相器と可変減衰器によって参照 波を調節し続けることが特徴である。このときの可変減衰器と可変移相器の変化 をPCで記録しているため、ビーム照射による位相変化を測定できる。これを位相 追尾法と呼ぶ。実際のところビーム照射時における可変減衰器の変化は1000分の 1以下で、大部分の調整は可変移相器によって行われている。また、これらの機器 制御システムは LabVIEW によって製作された。装置制御のための ADC と DAC は NI ELVIS (NI Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite) に内蔵 されたものを利用している。ADC は符号を含め 16bit、DAC は 14bit で制御され

る。測定装置の制御の詳細は次章に記述する。位相測定は、LabVIEW によって 可変減衰器と可変位相器に印加した電圧を記録して行っている。振幅測定の信号 は、主に、電波反射をスペクトラムアナライザ(Tektronix Real-Time Spectrum Analyzer :RSA3303B)によって記録している。記録は I/Q データ(正弦波の振幅 および位相の変化)と時間 t を.iqt ファイル形式で保存される。.iqt ファイルのテ キスト形式(.txt,.csv 形式)への変換、FFT(高速フーリエ変換)を行うソフトウェ アとして、Tektronix の提供する Read IQT を用いている。RSA の操作手順及び、 データ解析手順を記した自作のマニュアルを本論文付録 A.7 に記載する。



図 24: 測定回路の模式図

#### 3.2.4 測定装置の制御

零追尾法による位相測定の際は、電子ビーム照射中も連続して、可変位相器と可 変減衰器を制御し、零位法が要求する状態 (ビーム照射中も零出力 *č*=0) を保たね ばならない。このような制御は National Instruments 社のシステム開発ソフトウェ ア LabVIEW(Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench)と LabVIEW と連動する制御装置(NI ELVIS(NI Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite))を用いて実現された。このプログラムにおいては、検波 器によって電波反射の電圧を測定し、LabVIEW によってその電圧を記録追尾す る。この時、常に測定電圧値が減少するように可変減衰器と可変移相器に印加す る電圧を LabVIEW が制御することで、零追尾法による位相測定を実現している。 また前章においても述べているとおり、ビーム照射前にのみこの作業を行うこと



図 25: 受信機の写真



図 26: 測定機器一式

で、振幅零位法による振幅測定を実現している。なお本論文付録(A.5)に測定作 業手順の手引として、自作のマニュアルを記載する。

#### 3.2.5 位相変化における反射波ベクトルの回転中心

電子ビーム照射による温度上昇の範囲内で岩塩または氷の電波減衰率の変化は 極僅かであるため、実験における反射電波は電子ビーム照射によって、減衰を起 こさず位相のみが変化すると仮定する。(振幅測定の際には位相変化が振幅変化と して観測される)。しかしながら、我々の測定回路には電子ビームの照射の影響を 受けない固定的な信号の漏れ(直接波)が存在しているため、測定結果には、電 子ビーム照射による影響と、測定回路による影響が混在してしまう。 図 27 は金属可変位相器(図 28)を同軸管と交換し、反射電波の位相のみを変化さ せた際の測定結果を複素平面にプロットしたもので、横軸が実軸、縦軸が虚軸で ある。金属可変位相器は金属の棒を手動で金属の円筒から引き出すことで、線路 の長さを変え、位相変化を起こす単純な装置である。



図 27: 金属可変位相器によって位相のみを変化させた結果

図27中の円弧は、測定回路上の可変減衰器の電圧(反射信号の大きさ)をベクト ルの長さ、可変移相器の電圧(位相)を偏角に直して示したものである。この円 弧の中心を見積もると、原点からずれた点に回転中心があることが分かる。金属 可変位相器によっては位相変化のみが発生する筈であるが、測定上は、反射電波 の減衰量が増加してしまっている。以下にその原理を記す。



図 28: 金属可変位相器



図 29: 位相変化概念図 1

図 29 は図 27 と同様に、測定結果を複素平面にプロットしたものであるとし、横軸が実軸、縦軸が虚軸である。図中の $\vec{R1}$ は位相変化発生前の初期状態の反射電波の信号、 $\vec{R2}$ は位相変化発生後の反射電波の信号であるとする。いま、電子ビームの照射や金属可変位相器の操作によって位相変化のみが発生しているとすると、 $\vec{R1} \ge \vec{R2}$ の長さは等しくなる筈である。しかしながら、現実には $\vec{R1} \ge \vec{R2}$ の長

さは異なり、円弧の回転中心は原点とは異なる点に存在する状態である。これは、 測定回路上に実験の操作(電子ビームの照射や金属可変位相器の操作)の影響を 受けない固定的な信号の漏れ(直接波)が存在することが原因で、このような信 号の漏れは測定回路のサーキュレータや同軸管接続部でのインピーダンスの不整 合(図 30 中の赤い矢印)などから発生する。このため精密に位相変化を測定する には、電子ビームの照射による真の信号変化である *R*3(図 31)の位相変化を測定 し、評価しなければならない。



図 30: 直接波の発生源(一例)

しかしながら、実験において電子ビーム照射による位相変化は2MeV、1mAの 電子ビームに対し約0.08度と、極微小であるためグラフ中に点としてしか現れず、 円とみなして、中心を見積もる事が難しい。このため図32に示すように、反射波 が戻ってくる回路上に、可変位相器を加えて、人工的に大きな位相変化を起こす 事で円弧を描き、中心を見積もる案がある。この際、可変位相器の追加によって 回路の減衰量も変わってしまう為、可変減衰器も加えて調整する必要がある。



図 31: 位相変化概念図 2



図 32: 測定回路改良案

# 4 シミュレーションによる研究

我々の提唱するレーダー法においては、超高エネルギーニュートリノの入射に よる温度上昇によって局所的に誘電率が増加し、電波反射が起こることを想定し ている。本シュミレーションにおいては、上記の機構による電波反射をシミュレー ションによって行い、実験と比較することで、我々が想定する電波反射機構の検 証を行う。シミュレーションは以下の2つのシミュレータを用い、2つのステップ によって行った。

Geant4

粒子反応シミュレータプログラム [21]。電子ビームの岩塩と氷に対するエネルギー 損失を求めた。

これによって得た、電子ビームの侵入長、媒質中でのエネルギー損失分布を元に して、発生する熱量を得て、以下のシミュレータで用いる熱源の設定を行う。

COMSOL AB社 (スウェーデン) 製 COMSOL Multiphysics バージョン 4.3b 有限要素法ベースの汎用物理シミュレータ。熱伝搬と電波反射の同時シミュレー ションが可能。

COMSOL Multiphysics の特記すべき性質として、複数の物理現象を無制限かつ自由に組み合わせて連成解析が可能な点が挙げられる。このため、今回の研究である、同軸管内部の電波反射と熱伝搬の同時シミュレーションが可能であり、研究の目的と合致している。

# 4.1 有限要素法

有限要素法とは工学や物理学において用いられる、微分方程式を解くための数 値解法である。その基本的な思想は、熱、圧力、変位などの連続的な量を、有限 個の分割領域内で連続な関数による離散化モデルで近似することである。1950年 代に航空宇宙工業の分野において誕生し、1956年に、Tuner、Clough、Maritin、 Toppらによって発表された。また、1963年に Melosh が有限要素法の理論面に関 する重要な発見をし、このことにより、工学以外の他の分野においても広く用い られるようになった。構造問題において、系のポテンシャルエネルギーを最小に することで、一組の線形平衡方程式が導かれるが、ラプラスもしくはポアソン方 程式は汎関数の最小化と親和性が高いため、有限要素法を用いる事が出来る。ま た、有限要素法はいかなる微分方程式に対しても適応する事ができるため、構造 力学、熱伝達、流体力学等、様々な理論に対し応用され、特に近年のコンピュー タの高性能化によって、実用的なものとなった。現在では、航空機や自動車など の構造解析、原子力発電所の複雑な高温系統、地中内部の水流、圧縮性気体の流 れ、静電気学、潤滑問題、振動解析など、様々な分野に応用されている。

# 4.1.1 岩塩及び氷に対する電子、ガンマー線のエネルギー損失

媒質内で電波反射の元となる熱分布の時間経過をシミュレートするためには、シ ミュレータに電子ビームによる媒質の加熱の情報(位置、加熱量)を与えてやる 必要がある。そのため、第一の段階として、同軸管内部の媒質(岩塩粉末、氷)に 対する、電子ビームのエネルギー損失を求める必要がある。そこから得られたエ ネルギー分布を元にして、熱源の分布の情報を作成する。Geant4 は高エネルギー 物理学や宇宙線、原子核物理学等で多用される、粒子の物質中における振る舞い をシミュレートする粒子反応シミュレータで、入射する粒子、媒質の材質及び形 状、検出器のジオメトリなどを様々に設定することが出来る。

シミュレーションにおいては直径 20mm 高さ 20mm の円筒に岩塩粉末、氷を設定。 電子(1MeV,1.5MeV,2MeV の三種)をそれぞれ 100 万回打ち込み、エネルギー損 失を各セルごとに Gray(J/Kg) で出力させた。



図 33: Geant4の模式図。



図 34: Geant4 におけるジオメトリ



図 35: Geant4の図。媒質の周りの拡大図

# 媒質に対する電子ビームのエネルギー損失分布。

r 方向依存性の図 36 は z 方向依存性については無視したグラフである。 z 方向依存性の図 37 では r 方向依存性を無視している。同一の媒質に対しても電子ビームの電圧によって、広がりや侵入長が異なる事が分かる。侵入長だけでなく、エネルギー損失が集中する深さも異なるため、媒質に対する加熱の性質も電子ビームごとに異なった振る舞いを示す。



図 36: r 方向依存性



図 37: z 方向依存性

#### 4.1.2 有限要素法を用いた熱伝播および電波反射の連成シミュレーション

先ほど示したものは方向ごとに単純化しているが、シミュレーションでは80箇 所の熱源を設定するため、80セル分のエネルギー分布のデータを用意した。こ のエネルギー分布を元にして、熱源の分布を作成する。

本シミュレーションの次のステップとして、同軸管内部の熱伝搬と電波反射の シミュレーションを行う。このステップにおいては COMSOL AB 社(スウェー デン)製 COMSOL Multiphysics を用いる。今回の場合、熱伝搬と電波反射を同 時に利用することが出来る、"マイクロ波加熱"モジュールを使用した。COMSOL Multiphysics では熱伝導方程式、マクスウェル方程式によって熱伝搬と電波反射を 計算している。シミュレーションは電子ビーム照射開始をスタートとして 120 秒 間行う。電子ビームは実験と同様の開始より 60 秒間の照射を想定している。

# シミュレーションで用いた媒質のパラメータ

まず、シミュレーションで使用したパラメータを表2に示す[20][22]。岩塩の本 来の熱伝導率は6.4W/(m・K)ほどであるが、実験で粉末状の岩塩を同軸管に充填 している。このため、充填の具合によって熱伝導率が変化してしまう。特に、隙 間に空気 (熱伝導率 0.024W/(m・K))が入り込むことの影響は大きい。このため、 岩塩の熱伝導率は実験と比較的よく合う数値をシミュレーションから求めて用い た。しかしながら、完全に実験を再現することは出来なかった。詳細に関しては 章4.1.4 で後述する。また、岩塩の熱伝導率以外のパラメータは粉末の密度に比例 すると仮定した。

パラメータ	岩塩粉末	氷	単位
熱伝導率	0.2(一例)	2.2	$W/(m \cdot K)$
密度	1.19	0.9224	$g/cm^3$
比熱	473	2085	$J/kg \cdot K$
屈折率	0.000498T + 1.781	0.000260T + 1.786	1
比透磁率	1	1	1
導電率	0	0	S/m

T は誘電体の温度 (℃) である。

表 2: 岩塩粉末と氷のパラメータ

#### 物理モデルの設定

COMSOL Multiphysics には多数の物理モデルが用意されている。大別すると、 『AC/DC』『音響』『化学種輸送』『流体流れ』『伝熱』『光学』『プラズマ』『高周波』 『構造力学』『数学』が有り、更に細かい分類があり、目的に応じて適切なモジュー ルを選択することが可能である。今回のシミュレーションにおいては、『伝熱』の 内の『電磁加熱』の下に位置づけられる『マイクロ波加熱』モジュールを用いた。 『マイクロ波加熱』モジュールは電磁波の反射と熱の伝搬を同時にシミュレーショ ン出来るモジュールであるため、今回の目的とするシミュレーションにとって都 合が良い。このモジュールにおいては、熱伝搬と電磁波の計算を以下の式を用い て行っている。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \tag{43}$$

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 (\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0}) \mathbf{E} = \mathbf{0}$$
(44)

 $\rho$ : 密度、 $C_p$ : 定圧比熱容量、k: 熱伝導率、 $\mu_r$ : 透磁率、  $\epsilon_r$ : 比誘電率、 $\sigma$ : 導電率、 $k_0$ : 真空中での波数ベクトル

# ジオメトリと材質の設定

次に、シミュレーションのジオメトリと材質を設定する。 実験で利用している寸法と同一の寸法で同軸管と冷却箱上蓋のジオメトリを設定 する (図 38)。この際、計算を軽量化するために、冷却箱上蓋の縦横の寸法は一片 270mm から 40mm へ縮小してある (図 39)。冷却箱上蓋は厚さ 1cm のアルミ板を 2 枚、9mm の隙間で重ね、間に断熱のためのスタイロフォームを充填したものであ る。ただし、スタイロフォームは中央に半径 20mm の穴を開けてあり、電子ビー ムに影響を与えない (図 40)。内部導体 (真鍮) などの材質の設定も、現実の同軸管 と同様に行う。



図 38: 全体のジオメトリ

## 熱源の設定

同軸管の上面 (開放端面) から 10mm の誘電体が充填された領域を、r 方向は 8 分割 し、z 方向は 1mm ごとに 1 0 分割する。そして、合計 80 個の各領域に異なる熱源 を設定する。(図 43) 各熱源からの発熱は電子ビームのエネルギーと Geant4 で得 られたエネルギー損失を元にして与える。(2MeV、1mA のとき媒質上面に 4.3W)



図 39: 冷却箱上蓋



図 40: スタイロフォーム



図 41: r 方向の分割

図 42: z 方向の分割



図 43: 分割中に設定された熱源の例

同軸管の開放端側の内部導体 (真鍮)の表面と冷却箱の表面にも電子ビームが当たるため、熱源を設定する。熱はビーム電流と面積から計算して14490W/m<sup>2</sup>を与える。同軸管の外部導体 (銅) に関しては上面に被せた、アルミ製の冷却箱によって、電子ビームが遮蔽されるため、熱源を設定しない (図 44)。また、シミュレーションは電子ビーム照射 (加熱開始)より 120 秒間に渡って行われ、加熱はシミュレーション開始から 60 秒だけ行われる。つまり、始まりの 60 秒間は加熱過程のシミュレーションであり、残りの 60 秒間は冷却過程のシミュレーションである。



図 44: 表面に設定された熱源

# 初期温度の設定

初期温度を設定としては、スタイロフォームから上の冷却箱外側を実験日当日の外 気温 (30 ℃) に設定し (図 45)、それより下の領域を低温 (約-70 ℃) に設定する (図 46)。冷却箱外部は実験日の気温と近い 30 ℃に常に設定するが、内部は実験ごと に温度設定を変更する。実際には温度は均一ではなく、多少のムラがあり、その データも実際の実験における熱電対の測定があるが、シミュレーションでは均一な 温度を設定する。これは温度の異なる境界が隣接することで境界でのシミュレー ションが異常な挙動を示すためで、特に同軸管付近の温度シミュレーションでそ の影響を無視できなくなるためである。

# 熱抵抗薄層の設定

また、同軸管表面の設定として、熱抵抗薄層の設定を行う。この設定は二箇所に 行う。一つ目は同軸管外部導体の内側に行う (図 47)。これは実験に用いる同軸管





図 45: 冷却箱外側の初期温度

図 46: 冷却箱内側の初期温度

は表面が多少酸化しているため、熱伝導率を悪くした層を設定することで、より 現実に近づける為である。また、二つ目は同軸管外部導体の開放端面、冷却箱に 接する面に行う (図 48)。これは同軸管と冷却箱は密接しているとはいえ、現実に は僅かながら隙間が有るためである。





図 47: 熱抵抗薄層 1

図 48: 熱抵抗薄層 2

# 電波送信の設定

同軸管内部への電波送信は実験と同様に、開放端面の向かい側から行う。シミュ レーションにおいては『集中ポート』と呼ばれる設定を行うことで電波送信源を 図 49 の赤い矢印で示した同軸管の底部に設定する。『集中ポート』はポートタイ プを『同軸』『一様』『ユーザ設定』、ターミナルタイプを『ケーブル』『電流』『回 路』の中から選択出来、また、送信電波の初期位相や特性インピーダンス、波動 励起のオン・オフを設定出来る為、様々な状態に対応している。もし、ポートの波 動励起オフとして用いる場合は、波動励起オンのポートと向かい合わせて、ポー ト間の S<sub>21</sub> パラメータ (挿入損失:インサーションロス) をシミュレーションで求め る事も出来る。今回はポートタイプを『同軸』、ターミナルタイプを『ケーブル』 に設定し、特性インピーダンスを 50Ω、波動励起オンに設定して、波源として用 い、S<sub>11</sub> パラメータ (反射係数:リターンロス)のシミュレーション結果を取得する ことで、電波反射の様子を探る。

# メッシュの設定

有限要素解析は解析を行うために、対象を有限の要素に分割する必要がある。(図 50) この作業をメッシュ分割と呼ぶ。メッシュ分割は一般的には四面体で行われ る。これは、四面体が空間をすき間なく埋められる性質を持つためである。メッ





図 49: 波源

図 50: メッシュ分割の様子

シュ分割は正確なシミュレーションを行うにあたって重要な工程であるが、近年の シミュレータでは自動化されている場合が多い。COMSOL Multiphysics にもメッ シュ分割機能が有るためこれを利用する。メッシュ分割の妥当さに関しては後述 する。今回のシミュレーションにおいてもメッシュ分割には四面体を用いた。同 軸管は、最大要素サイズを約1.7mmに分割し、同軸管を除く周囲の領域は最大要 素サイズ 15mm の要素に分割した。これは同軸管の内部導体の直径を4.49mm と 設定しているため、この内部を3要素以上に分割することが、正確なシミュレー ションの為に奨励される為である。また、ここに記したメッシュサイズはあくま でも最大サイズであり、より細かいメッシュサイズが求められる領域においては、 自動的により小さなメッシュが設定される。



図 51: 電波反射シミュレーション

図 52: 熱伝搬シミュレーション

#### シミュレーションの様子

図 51 は電波反射シミュレーションの様子 (電場強度)、図 52 は熱伝搬シミュレー ションの様子である。

COMSOL Multiphysics はシミュレーションの結果を視覚化して表示することが可能であり、電場や熱分布の様子を容易に確認することができる。また、特定の場所における、電場強度や温度を数値的に出力することも可能である。

#### 4.1.3 メッシュの設定の評価

有限要素法の計算の精度は如何に的確にメッシュ分割を行うかに依存している。 このため、シミュレーションに当たってはメッシュ分割の妥当さを検討する必要 がある。以下に記述する二通りの簡易なシミュレーションを行うことで、メッシュ 分割の妥当さを調べた。

#### 同軸管の長さに対する位相変化の検討

本番のシミュレーションで用いる同軸管の長さを変更し、シミュレーションが出力 する線路長の変化に対する位相変化の値が、適切かを試験した。ここで言う線路 長とは、同軸管内を信号が往復する距離のことであり、つまり同軸管の長さの2倍 の事である。図53、図54参照。同軸管の長さは20mmごとに40mmから180mm に変化させた。シミュレーションと比較する線路長の変化に対する位相変化は、以 下の計算によって見積もっている。

線路長の変化をl、同軸管に充填された誘電体 (-60  $\mathbb{C}$ の氷)の誘電率を $\varepsilon$ 、送信する電波の周波数をf、波長を $\lambda$ 、期待される位相変化を $\Phi$ とし、もし 40mm 線路が伸びたとすると

$$\lambda = c/(f \times \sqrt{\varepsilon}) = 2.9979 \times 10^8 / (4.35 \times 10^9 \times \sqrt{3.1344}) = 389.27 \text{[mm]}$$
(45)

- $\Phi = (l/\lambda) \times 360 [\text{degree}] = 36.992 [\text{degree}] \qquad (46)$ 
  - (47)

の位相変化が起きるとしている。

また、ここで用いている線路長の変化は、同軸管の長さの変化の2倍である。この結果を図 55 に載せた。

計算値とシミュレーションの値は、ほぼ一致している。この結果からは、シミュ レーションが適正に行われていると言える。



図 53: 40mmの同軸管







図 55: 線路長を変えた際の位相変化

## 分布定数回路との比較による位相変化の検討

本番のシミュレーションで用いる同軸管と同一の寸法の同軸管に充填された誘 電体の誘電率を、先端10mm分だけ変更し、その変更に対する位相変化の値が、 適切かを試験した。ここでは、誘電体として氷を充填した状態を想定し、先端の 温度が-60℃から-50℃、-40℃、-30℃に変更した状態を仮定している。また、こ の際は熱伝搬のシミュレーションは行わず、電波反射のシミュレーションのみを 行った。シミュレーションと比較する誘電率の変化に対する位相変化は、分布定 数回路による計算によって見積もっている。分布定数回路とは、簡単に言うなら ば、電気回路に距離の概念を導入した際の計算モデルである。このモデルにおい ては、波の伝搬速度などが考慮され、高周波においても適切に回路内部の状況を 表せる計算モデルとなっている。分布定数回路と対比される計算モデルには集中 定数回路と呼ばれるものが有る。これは取り扱う信号の周波数の波長よりも十分 小さい形状で、かつ部品間の配線のインピーダンスが無視できる回路に対して用 いる計算モデルである。分布定数回路の概念図を図56に載せる。また、氷の誘電 率の温度依存性は、前述の表2を参照。この結果を図57に載せた。計算による値 とシミュレーションによる値はほぼ一致した。このことから、シミュレーション におけるメッシュ分割が適正に行われていることが分かり、熱伝搬と電波反射の 連成シミュレーションもこのメッシュ分割を用いて適切な値を出力することが期 待される。また、計算による値とシミュレーションによる値にはごく僅かながら 差がある。この理由としては、計算による見積もりでは、同軸管の開放端からの 電磁波の放出などを考慮していないが、シミュレーションにおいてはその効果が 現れる事が挙げられる。



 $\Gamma_1 と \Gamma_2 の 複素数 の 偏角 を 比べる$ 

図 56: 分布定数回路の概念図



# 分布定数回路との比較

図 57: 分布定数回路との比較

#### 4.1.4 測定結果とシミュレーション

氷の結果に関しては、章4.1.4 には 2MeV、1mA の結果のみを載せる。その他の 電流電圧値に対する結果は、付録 A.1 に載せた。シュミレーションを行った電子 ビームの想定電圧と電流、実験との比較内容を表3 に記す。

電圧	電流	温度変化比較	反射電波比較
2MeV	0.5mA	無し	有り
2MeV	0.75mA	無し	有り
2MeV	1mA	有り	有り
2MeV	2mA	有り	有り
1.5MeV	1mA	有り	有り
1.5MeV	1.33mA	無し	有り
1MeV	2mA	無し	有り
1MeV	1.5mA	無し	有り
1MeV	1mA	有り	有り

表 3: シミュレーション内容

温度変化比較が有るシミュレーションと無いシミュレーションが有るのは、比 較する実験データが取得されていないためである。反射電波比較は、位相変化と 振幅変化に対して行った。

氷に対し、2MeV、1mA の電子ビームを照射した際を想定したシミュレーション と、実験の温度変化の比較を図 58 と図 59 に、反射電波の位相変化、振幅変化の比 較を図 60 と図 61 にを載せた。図 61 には複数の実験の測定に基づく電波反射率が 載せてあるが、青色の系列は RSA で測定した値で、緑色の系列は実験の位相変化 から反射率を算出したものである。また、RSA の結果とほぼ一致している橙色の 系列は ELVIS によって測定された反射率である。初期温度が実験に対しずれてい る点があるのは、章 4.1.2 で記してある通り、全体で一様の初期温度の設定を行っ ている為である。

シミュレーションによる r=6mm(内側)の温度変化は実験に対し、僅かに低い程度 であるが、r=9mm(外側)の温度変化は、実験と比べて半分程度にとどまった。こ の傾向はほぼ全ての電子ビームに対して同様だった。この不一致は、シミュレー ションに現実の実験と同様の条件を入力することが出来ないために発生している。 考えられる一因としては、冷却箱に充填したドライアイスが、実験の経過ととも に昇華し、同軸管に対する冷却の度合いが変化している事も挙げられる。反射電 波の比較に関しては、シミュレーションの位相変化は実験に対して、2割ほど大 きな結果となった。図 61 に載せた振幅変化(エネルギー反射率)の比較は反射電 波の位相変化から算出したものである。シミュレーションと実験に不一致が見ら れることは、章 3.2.5 に記したように、測定結果に電子ビーム照射による影響と、 測定回路による影響が混在してしまっているためで、測定回路の校正が適正に行 われれば、実験結果はシミュレーションに近づく筈である。また、図 62 に各種の 電流、電圧値に対する、反射電波の強度を比較した結果を載せる。

シミュレーションは実験に対し、定量的には大きな結果となってしまっているが、 実験とシミュレーションには定性的な一致が見られ、両方とも反射率が電流×電 圧の二乗に比例していることが分かる。

式(48)はフレネルの式である。n1、n2は媒質の屈折率を表す。

$$\Gamma = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2} \tag{48}$$

この式より、反射率は屈折率の2乗で変化することが分かる。我々の想定する電 波反射機構では、温度上昇によって媒質の誘電率が上昇することで電波反射が発 生する。いま、Tを温度(℃)として、式(49)に示すように、媒質(氷)の屈折率は 温度に比例することが分かっている。

$$0.000260T + 1.786\tag{49}$$

また、温度上昇は入射した電子ビームのエネルギー損失(電流×電圧)に比例する。 このため、反射率はエネルギー損失(電流×電圧)の2乗に比例する。従って、こ の結果は、我々の想定する電波反射機構に対して、妥当な結果である。







図 59: 氷 (2MeV、1mA) の r=9mm での温度比較



図 60: 氷 (2MeV、1mA) 位相変化シミュレーション



図 61: 氷 (2MeV、1mA) 反射率シミュレーション



図 62: 各種の電流、電圧値に対する、反射電波の強度

岩塩粉末に関しては、シミュレーションにおいて適正なパラメータを見つけるこ とが出来なかった。この原因としては、章4.1.2に記したとおり、岩塩粉末と空気 の混合による影響があるためである。特に影響が大きいと思われる熱伝導率を岩 塩塊の熱伝導率 6.4W/(m・K) から空気と同等の 0.024W/(m・K) まで様々に変化 させてシミュレーションを行ってみたが実験とあまり一致しなかった。章4.1.4で はその一例として岩塩粉末の熱伝導率を 0.2W/(m・K) とし、ビーム電圧、電流を 2MeV、1mA とした時の結果を載せる。図 63 と図 64 に温度変化の比較を載せ、反 射電波における位相変化の比較を図 65 に載せた。熱変化に関して開放端から 2mm の値は、r=9mm と r=6mm ともよく一致するが、開放端から 7mm の値は大きく ずれてしまっている。



図 63: 岩塩 (2MeV、1mA) の r=6mm での温度比較







図 65: 氷 (2MeV、1mA) 位相変化シミュレーション

#### 電子ビーム照射直後における電波反射発生の様子

図 66 に、2MeV、2mA の電子ビームを岩塩に照射した際の結果を載せる。また、



図 66: 岩塩 (2MeV、2mA) ビーム照射直後の電波反射率測定

この図においては、電子ビーム照射直後10秒間の様子を拡大して載せている。実験においては、60秒間電子ビームを照射し電波反射を測定しているが、実際の超高エネルギーニュートリノの入射による温度上昇は一瞬で発生し、電波反射の発生も瞬間的であることが予測される。

しかしながら、図66から分かる通り、RSAは高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform、FFT)によってノイズを除去しているため、精密な測定が可能であり、たとえ1秒以内の短い時間でも温度上昇に応じて電波反射の測定が可能である事が分かる。このことは、超高エネルギーニュートリノの入射の様な瞬間的な現象に対しても、温度上昇による電波反射の発生を捉えることが可能であることを意味している。
## 5 まとめ

宇宙から飛来する超高エネルギーニュートリノは通常の加速器実験で得られる エネルギーより遥かに大きなエネルギーで地球に入射する。このため、超高エネル ギーニュートリノと物質との相互作用断面積測定によって、加速器実験では得られ ない超高エネルギー領域での素粒子標準モデルの検証を行うことが出来る。SND 実験グループは天然に存在する岩塩鉱山や南極氷床を媒質として利用し、超高エ ネルギーニュートリノの入射を検出するレーダー法の実現を目指し、その基礎原 理の追求のために、世界各地の岩塩鉱山の電波減衰の測定や、電子ビームを用い た媒質の局所的加熱による誘電率変化点からの電波反射の測定など、多くの実験 を行ってきた。

本研究においては、媒質の温度上昇を利用した電波反射機構をより詳細に解明 するために、媒質を充填した同軸管に電子ビームを 60 秒間照射した実験とシミュ レーションを比較した。

複数の熱電対を使用して、レーダー法の想定する電波反射機構にとって重要な 情報となる、同軸管内部の媒質の詳細な熱分布の時間経過を測定した。また、そ れと同時に電波反射の反射率の変化と反射電波の位相変化を測定した。

シミュレーションにおいては、三次元有限要素法によって、電子ビーム照射に よる温度上昇と、その熱伝搬および電波反射を同時にシミュレーションした。

実験とシミュレーションを比較したところ、シミュレーションは氷の実験に対し て温度上昇が50%以内で一致した。電波反射の位相とエネルギー反射率は実験に 対して、シミュレーションは実験に対し最大2倍以内の大きさの結果が得られた。

媒質の屈折率は温度上昇に比例して増加するため、我々の想定する電波反射機 構においては、電波反射率はフレネルの反射公式にしたがって、温度の二乗に比 例して増加する。実験において、温度上昇は電子ビームによる入射エネルギーに 比例して上昇し、電波反射率は温度上昇の二乗に比例することが確認された。ま た、シミュレーションにおいても、電波反射率は電子ビームの入射エネルギーの 二乗に比例することが確認できた。

本研究によって、レーダー法による入射粒子検出の原理となる、媒質の温度上 昇により現れる、誘電率不連続境界からの電波反射境界の発生という電波反射機 構がより詳細に解明された。

シミュレーションによって反射電波の想定値が得られたことで、実験に用いて いる測定回路になお改良の余地が有ることも判明した。今後は、電波反射測定に おける位相変化をより正確に見積もるために回路に改良を加える予定である。

低温室における摂動空洞共振器法を用いた氷の誘電率測定において、500MHzと 1GHzの周波数において1km 近い電波減衰長が得られ、レーダー法の実践に対し 肯定的な知見が得られた。

# 謝辞

住吉孝行教授は研究の指導だけでなく、セミナー等を通じて、素粒子物理学の 基礎知識を多数、ご教授下さいました。指導教員の千葉雅美助教、上條敏生助教 (電気電子工学専攻)からは、私の研究活動のあらゆる事柄について御指導を頂き、 私の研究者として活動を支えて下さいました。首都大学東京の高エネルギー実験 研究室の汲田哲郎助教、角野秀一准教授からは研究の課題点等に関して鋭い指摘 を度々頂き、研究の方針について大きな影響を頂きました。SND研究グループの 矢吹文昭先生、内海倫明先生には高崎での電子ビーム照射実験における装置の設 置、操作などの作業において、欠かすことの出来ない役割を担っていただきまし た。首都大学東京の浜津良輔客員准教授からはGeant4の取り扱いに関して、大変 なご助力を頂きました。成蹊大学の近匡先生、近重悠一先生、清水先生には成蹊 大学 SND グループの研究として岩塩及び氷の電波減衰長特性の調査など多数の面 でお世話になりました。私の研究活動において、成蹊大学での研究報告や論文は 大変参考になりました。このように、本研究は多くの方々の協力と助成がありま した。私の未熟を支えて下さいました全ての方々に感謝の意を表したいと思いま す。本当にありがとうございました。

# 6 参考文献

# 参考文献

- K. Greisen, Phys. Rev. Lett. 16 (1966) 748; G.T. Zatsepin, V.A. Kuzmin, Zh. Eksp. Teor. Fiz.
- [2] Kenji Shinozaki Max-Planck-Institut f" ur Physics, F" oringer Ring 6,80805 Munich, Germany for AGASA Collaboration\* Nuclear Physics B(Proc. Suppl.) 151 (2006)
- [3] V.Berezinsky Nuclear Physics B(Proc. Supll.) 151(2006) 260-269
- [4] D.V.Semikoz Nuclear Physics B(Proc. Supll.) 145(2005) 166-169
- [5] A.M. Hilias, Ann. Rev. Astron. Astrop. 22 (1984) 425
- [6] G. A. Askar ' yan Soviet Physics JETP 14 441 (1952).
- [7] P.W.Gorham et al, Physical Review D 72,023003 (2005).
- [8] 岩塩超高エネルギーニュートリノ検出器におけるアンテナ特性と検出効率,中 村 俊介首都大学東京大学院理工学研究科修士論文 (2008/1/20)
- [9] 岩塩超高エネルギーニュートリノ検出実験用アンテナの考察, 柴崎祐治首都大 学東京大学院理工学研究科修士論文 (2006)
- [10] レーダー法による超高エネルギーニュートリノ検出のための岩塩の電波減衰 長の測定, 荒川葉子首都大学東京大学院理工学研究科修士論文 (2010/2/9)
- [11] "Measurements of the Suitability of Large Rock Salt Formations for Radio Detection of High Energy Neutrinos" (arXiv:hep-ex/0108027 v2 23 Jan 2002)
- [12] 橋本修:「高周波領域における材料定数測定法」, 森北出版, 2003
- [13] 飯島康:準マイクロ波帯~マイクロ波帯での評価に最適な~高精度摂動法によ る誘電材料の測定 (Electronic Monthly 1998.7)
- [14] 小西良弘:実用マイクロ波技術講座 理論と実践 第一巻(日刊工業新聞社)
- [15] 小笠原直幸 鈴木道也 布施正:ミリ波工学(ラテイス)
- [16] 小西良弘著:実用マイクロ波技術講座一理論と実際 (ケイラボ出版)
- [17] Matzler, C and Wegmuller, U., J. Appl. Phys. 80, 1623-1630(1987)

- [18] Matsuoka, T, Fujita, S and Mae, S., J. Appl Phys. 80,5884-5890(1996)
- [19] Takeshi Matsuoka,a) Shuji Fujita, and Shinji Mae.,Effect of temperature on dielectric properties of ice in the range 5-39 GHz. J. Appl. Phys. 80, 5884-5890 (1996)
- [20] Chiba M et al. 2004 Physics of Atomic Nuclei 67 2050.
- [21] Geant4 Collaboration (S. Agostinelli et al), Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, NIM A 506 (2003), 250-303.
- [22] "Anharmonicity and Millimeter-Wave Absorption in Alkali-Halide Crystals" (PHYSICAL REVIEW; VOLUME181, NUMBER 3)
- [23] JAERI-M 86-005 高崎研1号加速器(デュアルビーム型, 2MeV, 60kW)の電 子線出力特性 日本原子力研究所高崎研究所開発部 金沢孝夫, 春山保幸, 宇野 定則, 四本圭一, 田中隆一, 鷲野正光, 吉田健三
- [24] M.Chiba, T.Kamijo, M.Kawaki, H.Athar, M.Inuzuka, M.Ikeda, O.Yasuda,Proc. 1st Int. Workshop for Radio detection if High Energy Particles [RADHEP-2000], UCLA, AIP Conf. Proc. 579, p.204 (2000)
- [25] Masami Chiba, Toshio Kamijo, et al.Measurement of a Phase of a Radio Wave Reflected from Rock Salt and Ice Irradiated by an Electron Beam for Detection of Ultra-High-Energy Neutrinos. AIP Conf. Proc. 1535, 45-50 (2013); http://dx.doi.org/10.1063/1.4807519. http://arxiv.org/abs/1307.1767
- [26] Masami Chiba, Toshio Kamijo, et al. Radar for Detection of Ultra -High-Energy Neutrinos Reacting in a Rock Salt Dome. Nucl. Instr. and Meth. A662 (2012)S222-S225, doi:10.1016/j.nima.2010.11.165
- [27] Masami Chiba, Yoko Arakawa, et al. Radar for salt ultra-high-energy neutrino detector and contribution of W-gluon fusion process to collision of neutrinos against protons Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A604(2009)S233-S235. doi:10.1016/j.nima.2009.03.066
- [28] Masami Chiba, Yoko Arakawa, Toshio Kamijo, et al. Reflection of Microwave from Energy Deposit by X-ray Irradiation in Rock Salt: Implying Salt Ultra High Energy Neutrino Detector to act like a Radio Bubble Chamber. Proc. of The 15th international Conference on SUSY07, Volume I, pp850-853 (2008). arXiv:0710.418v1 [astro-ph] 23 Oct 2007

- [29] Masami Chiba, Yoko Arakawa, et al. Measurement of Attenuation Length For UHF Radio Wave in Natural Rock Salt Samples Concerning Ultra High Energy Neutrino Detection. Proc. of the International Workshop on Energy Budget in the High Energy Universe, pp319-322, March(2007)
- [30] YUSUKE WATANABE, et al. Simulation of Salt Neutrino Detector Performance for Ultra High Energy Neutrino Detection. Proc. of the International Workshop on Energy Budget in the High Energy Universe, pp315-318, March (2007).
- [31] T.Kamijo, M.Chiba, Memoirs of Faculty of Tech., Tokyo Metropolitan University, No.51 2001, 139(2002)
- [32] M.Chiba etal., Proc .of the First NCTS Workshop Astroparticle Physics, Taiwan, World Scientific Publishing Co. Ltd. P.99 (2002)
- [33] T.Kamijo, M.Chiba, in Proc. Of SPIE 4858 Particle Astroparticle Physics Instrumentation, edited by Peter W.Gorhm, (SPIE, Bellingham, WA)p.151 (2003)
- [34] 清水隆志,小林禧夫,馬哲旺,"同軸励振円板共振器法による誘電体基板の複素 誘電率温度依存性測定,"2007 電子情報通信学会ソサエティ大会, C-2-79, Sep. 2007.

# A 付録

A.1 測定結果とシミュレーションの比較

氷 (2MeV 0.5mA) のシミュレーション結果と比較



図 67: 氷 (2MV 0.5mA) 位相変化シミュレーション



図 68: 氷 (2MV 0.5mA) 反射率シミュレーション

氷 (2MeV 0.75mA) のシミュレーション結果と比較



図 69: 氷 (2MV 0.75mA) 位相変化シミュレーション



図 70: 氷 (2MV 0.75mA) 反射率シミュレーション

氷 (2MeV 2mA) のシミュレーション結果と比較



図 71: 氷 (2MeV2mA) の r=6mm での温度比較



図 72: 氷 (2MeV2mA) の r=9mm での温度比較



図 73: 氷 (2MeV 2mA) 位相変化シミュレーション



エネルギー反射率(氷2MeV,2mA)

図 74: 氷 (2MeV 2mA) 反射率シミュレーション

氷 (1.5MeV 1mA) のシミュレーション結果と比較



図 75: 氷 (1.5MeV1mA) の r=6mm での温度比較



図 76: 氷 (1.5MeV1mA) の r=9mm での温度比較



図 77: 氷 (1.5MeV 1mA) 位相変化シミュレーション



図 78: 氷 (1.5MeV 1mA) 反射率シミュレーション

氷 (1.5MeV 1.33mA) のシミュレーション結果と比較



図 79: 氷 (1.5MeV 1.33mA) 位相変化シミュレーション



図 80: 氷 (1.5MeV 1.33mA) 反射率シミュレーション

氷 (1MeV 2mA) のシミュレーション結果と比較



図 81: 氷 (1MeV 2mA) 位相変化シミュレーション



図 82: 氷 (1MeV 2mA) 反射率シミュレーション

氷 (1MeV 1.5mA) のシミュレーション結果と比較



図 83: 氷 (1MeV 1.5mA) 位相変化シミュレーション



図 84: 氷 (1MeV 1.5mA) 反射率シミュレーション

氷 (1MeV 1mA) のシミュレーション結果と比較







図 86: 氷 (1MeV1mA) の r=9mm での温度比較



図 87: 氷 (1MeV1mA) 位相変化シミュレーション



図 88: 氷 (1MeV1mA) 反射率シミュレーション

1MeV1mAの電子ビーム実験においては、反射電波の変化が非常に小さいため、 現在用いている検出器の性能では電子ビームによる変化を測定できていない。

## A.2 摂動共振器法における誘電損失の評価

共振器内部に蓄積されたエネルギーは時間と独立しており、電場または磁場か ら決定することができる。ここで、電場と磁場のエネルギーは等しいとする。こ のとき、共振器内部に蓄積されたエネルギーは、以下の式 (50) で与えられる。

$$W = \iiint \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r |E|^2 dV \tag{50}$$

ここで、*dV* は体積要素、積分は共振器全体に渡って行う。 同様に、共振器全体に誘電体充填された共振器に蓄積されたエネルギーは以下の 式 (51) で与えられる。

$$W_s = \iiint \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r |E|^2 dV \tag{51}$$

また、散逸したエネルギーは以下の式(52)で与えられる。

$$W_d = \iiint \frac{1}{2}\sigma |E|^2 dV \tag{52}$$

ここで、σは導電率である。

誘電体の Q 値 (Quality factor) は以下のように式 (53) で表せる。

$$Q_d = \omega \frac{\iiint \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r |E|^2 dV}{\iiint \frac{1}{2} \sigma |E|^2 dV} = \frac{\omega \varepsilon_r \varepsilon_0}{\sigma} = \frac{1}{tan\delta}$$
(53)

まず最初に摂動を考えない状態 (添え字 0) を想定し、次に摂動のある状態 (添え 字 1) を想定する。共振器中の電場と地場はそれぞれ、 $E_0 \exp(j\omega_0 t), H_0 \exp(j\omega_0 t)$ と  $E_1 \exp(j\omega_1 t), H_1 \exp(j\omega_1 t)$  である。

マクスウェルの式より、我々は以下の式を知っている。

$$\nabla \times \boldsymbol{E}_{\boldsymbol{0}} = -j\omega_0 \boldsymbol{B}_{\boldsymbol{0}} \tag{54}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{H}_1 = j\omega_0 \boldsymbol{D}_1 \tag{55}$$

(56)

もし、最初の式に *H*<sub>1</sub>を掛け、次式に *E*<sub>0</sub>を掛けてそれらを差し引くと以下の式 (57) を得る。

$$\boldsymbol{H}_{1}(\nabla \times \boldsymbol{E}_{0}) - \boldsymbol{E}_{0}(\nabla \times \boldsymbol{H}_{1}) = -j\omega_{0}\boldsymbol{B}_{0}\boldsymbol{H}_{1} - j\omega_{1}\boldsymbol{E}_{1}\boldsymbol{D}_{1}$$
(57)

ここから以下の式 (58) が導かれる

$$\nabla(\boldsymbol{E_0} \times \boldsymbol{H_1}) = -j\omega_0 \boldsymbol{H_1} \boldsymbol{B_0} - j\omega_1 \boldsymbol{E_0} \boldsymbol{D_1}$$
(58)

体積積分とガウスの定理(式(59)から、

$$\iiint \nabla \mathbf{A} dV = \iint \mathbf{A} dS \tag{59}$$

以下の式(61)が導かれる

$$\iint (\boldsymbol{E_0} \times \boldsymbol{H_1}) dS = \iiint (-j\omega_0 \boldsymbol{B_0} \boldsymbol{H_1} - j\omega_1 \boldsymbol{E_0} \boldsymbol{D_1}) dV$$
(60)

もし、完全導体の壁面を想定すると*E*は壁に対し垂直で、*H*はその接線方向となる。その結果として、それらの外積の法線成分は0になる。

上記の式(61)は、添字を整理して以下の式62のように書き換えることができる。

$$j\omega_0 \iiint (-\boldsymbol{B_0}\boldsymbol{H_1} + \boldsymbol{E_1}\boldsymbol{D_0})dV = j\omega_1 \iiint (-\boldsymbol{B_1}\boldsymbol{H_0} + \boldsymbol{E_0}\boldsymbol{D_1})dV$$
(61)

これは、 $\omega_1 = \omega_0 + \delta \omega$  と置き換えることで、以下の式 (62) の様に書き換えることが出来る。

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{\iiint_{V_1} (\boldsymbol{E_1}\boldsymbol{D_0} - \boldsymbol{E_0}\boldsymbol{D_1}) - (\boldsymbol{B_0}\boldsymbol{H_1} - \boldsymbol{B_1}\boldsymbol{H_0})dV}{\iiint(-\boldsymbol{B_1}\boldsymbol{H_0} + \boldsymbol{E_0}\boldsymbol{D_1})dV}$$
(62)

もし、試料が非磁性体である場合、分母の第二項は0になる。もし、試料が、等 方的で均一である場合、以下の式(63)を得る。

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{\iiint_{V_1}((\varepsilon_0(\varepsilon_r - 1))\boldsymbol{E_1}\boldsymbol{E_0}) - (\mu_0(1 - \mu_r)\boldsymbol{H_1}\boldsymbol{H_0})dV}{\iiint(-\boldsymbol{B_1}\boldsymbol{H_0} + \boldsymbol{E_0}\boldsymbol{D_1})dV}$$
(63)

そして、もし摂動が小さい場合、以下の式(64)のようになる。

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{\iiint_{V_1}((\varepsilon_0(\varepsilon_r - 1))\boldsymbol{E_1}\boldsymbol{E_0}) - (\mu_0(1 - \mu_r)\boldsymbol{H_1}\boldsymbol{H_0})dV}{\iiint(-\boldsymbol{B_0}\boldsymbol{H_0} + \boldsymbol{E_0}\boldsymbol{D_0})dV}$$
(64)

ここで、積分を実行すると、以下の式(65)を得る。

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{((\varepsilon_0(\varepsilon_r - 1))\boldsymbol{E_1}\boldsymbol{E_0}) - (\mu_0(1 - \mu_r)\boldsymbol{H_1}\boldsymbol{H_0})V_1}{4W_0}$$
(65)

長さL、半径r = bの円筒形の試料を想定する。電場の接線成分の連続性 $(E_1 = E_0)$ を考慮すると、式(65)は以下の式(66)のように書き換えることが出来る。

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{\left((\varepsilon_0(\varepsilon_r - 1))|\boldsymbol{E_{00}}|^2 \pi b^2 L\right)}{4W_0} \tag{66}$$

試料の内部と外部の電場を検討すると、

$$\begin{cases} E_1 = E_z = A J_0(\sqrt{\varepsilon_r} k_1 r) \\ E_1 = E_z = B J_0(k_1 r) + C Y_0(k_1 r) \end{cases}$$
(67)

ここで、A、B、Cは定数。 $J_0 \ge Y_0$ は一次と二次のベッセル関数、また $k_1 = \omega_1/c$ である。いま、A = 1として、定数 $B \ge C$ は $E_z \ge \partial E_z/\partial r$ が円筒の表面で連続になるように決定する。すなわち、

$$B = \frac{Y_0(k_1 a) J_0(\sqrt{\varepsilon_r} k_1 a)}{J_0(k_1 b) Y_0(k_1 a) - J_0(k_1 a) Y_0(k_1 a)}$$
(68)

$$C = -BJ_0(k_1a)/Y_0(k_1a) (69)$$

r = a で  $E_z = 0$  とすると、以下の式 (70) を得る。

$$\sqrt{\varepsilon_r} \frac{J_1\left(\sqrt{\varepsilon_r}k_1b\right)}{J_0\left(\sqrt{\varepsilon_r}k_1b\right)} = \frac{J_1(k_1b)Y_0(k_1a) - Y_1(k_1b)J_0(k_1a)}{J_0(k_1b)Y_0(k_1a) - Y_0(k_1b)J_0(k_1a)}$$
(70)

すなわち異なる値、*a*、*b*に対して、*k*<sub>1</sub>を数値的に決定することが出来る。 空の共振器に対して、共振周波数を決定することができ、

$$\omega_0 = k_0 c = 2.405 (c/a) \tag{71}$$

空の共振器に対する電場は以下の式(70)で与えられ、

$$E_0 = E_z = J_0(k_0 r) \tag{72}$$

また、磁場は以下の式(72)で与えられる。

$$H_0 = H_\theta = j J_1(k_0 r) \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}$$
(73)

摂動している共振器の磁場は以下の式(74)で与えられ、

$$H_1 = H_\theta = j\sqrt{\epsilon_r}\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} J_1\left(\sqrt{\epsilon_r}k_0r\right) \tag{74}$$

試料の内側と外側においては式 (75) で表される。

$$H_1 = H_\theta = j \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \left[ B J_1(k_1 r) + C Y_1(k_1 r) \right]$$
(75)

また、共振器に蓄積するエネルギーは式(76)で表される。

$$W_0 = \pi \varepsilon_0 L \int_a^b J_0(k_0 r)^2 r dr$$
(76)

式 (66) に式 (76) を代入し、 $E_{00} = 1$  であることに注意すると、以下の、式 (77)

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = 1.856(1 - \varepsilon_r)(b/a)^2 \tag{77}$$

## A.3 低温室における氷の誘電率測定作業の詳細

## A.3.1 国立極地研究所



図 89: 国立極地研究所

国立極地研究所(National Institute of Polar Research)は、大学共同利用機関である。

南極、北極などの地域(極地)に関する総合的な研究を行っており、その役割は おおまかに下記の通り。

- 極地科学研究と極地観測の拠点国立極地研究所は、南極大陸と北極圏に観測 基地を擁し、極域での観測を基盤に総合研究を行っている。大学共同利用機 関として、全国の研究者に南極・北極における観測の基盤を提供し、共同研 究課題の公募、試資料・情報提供を実施することで極域科学の推進に取り組 んでいる。
- 南極地域観測の中核機関日本の南極地域観測計画を企画立案・実施している。
   南極地域にある観測基地施設の維持管理、運営を行い、南極地域観測隊の編
   成準備、各種訓練、観測事業に必要な物資の調達、搬入計画の作成や観測で
   得られた試資料の保管などを行う。
- 北極観測実施の中核機関北極圏に関する多種多様な観測を実施している。また、北極海やグリーンランド周辺における海域の海洋生態系・大気観測を実施している。さらに、平成23年度からは、グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス (GRENE) 北極気候変動研究事業を開始した。
- 研究者の育成機関平成5年度から総合研究大学院大学に参画。極域科学専攻 (5年一貫制博士課程及び博士後期課程)として教育研究指導を行っている。

また、他大学の要請に応じて、特別共同利用研究員として他大学の大学院学 生を受け入れるだけでなく、他大学大学院と協力し、連携大学院を実施して いる。



## A.3.2 国立極地研究所低温室

図 90: 低温室間取り

極地研はその用途に応じて複数の低温室(0℃から-50℃)までがある。また、 安全対策として、入室の規定が定められ、緊急時の通報装置、室内の監視装置が 設置されている。図90に示す写真は室内の間取り図としてだけでなく入室管理の ための役割があり、入室者は、該当する部屋にマグネットを貼らなくてはならな い。これによって、他者からも入室者の有無が確認できる。

図 91 は内部モニター装置の一つである。定温室内の電灯が灯っている部屋、つ まり入室者の居る部屋が赤く示され、灯っていない部屋は緑色で示されている。こ の装置の他にも監視カメラがあり、内部の様子を確認することが可能である。内 部の温度、作業室の様子はインターネット上からも確認できる。また室内には緊 急時の通報ボタン (図 92) が作業者の足元ほどの高さに設置され、もし作業者がが 立ち上がることが出来ない状況に陥ったとしても外部に異常を知らせることが可 能となっている。また、図 95 の写真が示すように、入室する際は防寒具を着用し て作業に当たる。



図 91: 入室管理モニター



図 92: 非常時通報ボタン



図 93: 低温室 (-30 ℃) に設置された共振器。左から、500MHz、700MHz、1GHz



図 94: 低温室に隣接した、常温の部屋に設置された測定機器類



図 95: 低温室の一室

### A.3.3 試料作製

試料の元となる水は純水を用いる。純水は首都大学東京、理工学研究科に設置 された純水製造装置 (Millipore 社 Elix UV 3) から取得し、極地研まで運搬する。 純水は 18.2M Ω・cm、3bbp の物を利用している。

氷の冷却工程は、不純物を含まない試料を作成する為に、前年度より多くの試行 錯誤が行われてきた。氷は低温室に放置することで作成している。実験の初期に おいては-30℃の部屋において製氷が試みられたが、あまり適切な温度ではなかっ たため現在は-15℃の部屋で作成されたものが多い。以下に示すものは、比較的成 功率が高いものである。



図 96: 空気吹き込み方



図 97: 空気吹き込み式によって作成された氷

図 96、図 97 に示した製氷方法は、10 リットルの純水タンクの中央部にパイプを 差し込み、エアーポンプによって空気を吹き込み続けながら冷却する方法である。 こうすることによって、中央部を凍らせず、周囲から冷却が進み、水中の不純物 (気体など)が中央部に集まる効果が有る。外縁部は透明度が高い氷が大体積で切 り出せるため、500MHz、700MHzの円筒空洞共振器に用いる様な長さ10cmの試 料の元を入手することが出来る。(なお加工作業のため10cmより長さが必要)図 96に見られる周囲の覆いは、冷却を極力緩やかにし、また温度勾配を作ることで、 より綺麗に氷を作るための工夫である。理想としては冷却の最後の段階まで、中 央部は凍らないことが望ましいが、実際にはエアーポンプによって低温室の冷た い空気が吹き込まれる為、パイプ周囲が凍ってしまう。そのため、図 97 に見られ るように、中央部から凍りだした氷と、外縁部から凍りだした氷が中心付近でぶ つかり、そこに円錐状の不純物の領域を作成する。この方法によって氷を作成す るには、約1週間が必要である。



図 98: 低速冷却法



図 99: 低速冷却法によって作成された氷

図 98、図 99 に示した製氷方法は、断熱性の高いステンレス製のランチジャー

(真空断熱された、食品保存用容器)内に断熱材を巻いたプラスチックケースを収 め、その中で、時間を掛けて氷を作成する方法である。保冷剤を巻くことは、ただ 断熱性を高めるだけでなく、ランチジャーとケースの隙間を塞ぐ効果があり、より 効果的に保温を行う。このことによってより低速な製氷を実現している。(一般に ゆっくりと凍らせた方が美しい試料が出来る)また、上部は開放状態、あるいは 多少蓋をする程度の留めることも工夫の一つである。これによって、ケースの水 に温度勾配が出来、上面から凍らせ、氷の下部に不純物が集中するよう制御する ことが出来る。この方法によって氷を作成するには、約1週間が必要である。図 99では製氷時と上下が逆転しているが、上部に不純物が集中している様子が分か る。また、作業者が手袋をしているが、これは試料の汚染を防ぐためである。氷 の作成の全工程を通じて(後述する加工、測定のプロセスにおいても)試料の汚 染を防ぐために最大限の注意が払われている。



#### 図 100: 失敗した氷

図 100 に示した氷は製造に失敗した氷である。中央に気泡が混じってしまって いるため、この氷からは試料を切り出すことが出来ない。氷の製造は様々な方法 が幾度も試されているが、成功率はあまり高くない。一度成功した方法を再度行っ ても、再現性が得られない場合があり、上手く作成された氷試料は貴重である。ま た、氷は脆く、割れやすい為、後述の試料加工のプロセスにおいても、試料が失 われてしまう。

### A.3.4 試料加工



図 101: バンドソーを用いた加工の様子



図 102: 多角形に整形された試料

加工の最初の段階として、バンドソーを用いて、氷の不純物の無い部分を大ま かに切り取り、その後、旋盤加工が行える様に、多角形に整形する。(図 101、図 102)

次の段階として、旋盤を用いて、試料を円筒型に整形する。円筒の軸が旋盤の 回転軸とずれている場合、偏心運動を起こしてしまうため、旋盤への取り付けは 細心の注意が必要である。また、試料側面の平滑はこの際に決まる。そのため、荒 削りの際は刃物台を手動で比較的素早く操作し、最後の仕上げに置いては、自動 送りを用いて(旋盤のモーターと連動)ゆっくりと削ることで仕上げる。



図 103: 旋盤を用いた加工の様子



図 104: ミクロトームを用いた加工の様子

次に、ミクロトームを用いて、上下端の加工を行う。ミクロトームはおおまか に、試料を取り付ける移動台と、試料表面を剃り落とすカッターからできている。 移動台を前後させることによって、規定量だけ、移動台を上昇させる機構が備わっ ているため、移動台をスライドさせた回数から、剃り落とした長さが分かる。本 来は顕微鏡で観察するために試料の切片を作成するための機材である。このプロ セスによって氷を共振器に収める試料として、適正なサイズに整形する。また、綺 麗に加工された試料は自立する。



図 105: ミクロトームによる加工時に破損した試料

図 105 に示した試料はミクロトーム加工時に破損した試料である。氷は脆く割 れやすい為、ふとしたはずみに破損することがある。氷内部にあらかじめ存在し た割れが進行することで、旋盤加工時に折れてしまったり、不注意によって落下 させてしまったりすると容易に破損してしまう。試料の加工は1日に2、3本が 限度であるので、加工作業の最終段階で試料を損壊すると、損失が大きい。

また、氷試料は保管にも、注意を要する。図106に示した試料は去年作成した試料であるが、大部分が欠損してしまっている。氷点下の低温室であるので、試料の融解は起きない。これは昇華が原因である。たとえ-10℃の低温室においても、 氷は昇華を起こす。このため試料は鮮度とでも呼ぶべきものがあり、作成後は出 来る限り、速やかに測定を行う必要がある。また、昇華の影響を出来る限り小さ くするために、図107に示すように密封出来る小袋に収めて、さらにハードケー スに収め-30℃の低温室で保管する。ハードケースに収めることで、不意の衝撃な どからも試料を守ることができるだけ無く、運搬中に体温によって試料を融解さ せてしまう事態を防ぐことが出来る。



# 図 106: 昇華してしまった試料



図 107: 氷試料保管の様子

### A.3.5 偏光板を用いた測定試料の評価

氷の誘電率は試料の結晶方向の影響を受けるため、測定試料は出来ることなら ば単結晶であることが望ましいが、製作の都合上、困難である。測定に用いた氷 試料を偏光板に挟むことで結晶構造を観察し、参考とした。図 108 に示した写真 は、低速冷却法で凍らせた円柱形の氷塊からバンドソーで切り出した試料を偏光 板に挟んだ際の写真である。物差しの目盛りから分かるように、大きい部分では 1cm 以上の単結晶の部分がある。図 109 に示した写真は、実際に共振器に挿入し た試料 (10cm)を偏光板で挟んだ際の写真である。試料内部の結晶構造を見て取る ことが出来る。レーダー法の実践においても、対象となる氷床には写真程度の結 晶構造を有することが予測される。



図 108: 円盤状に切り出した氷試料

#### A.3.6 測定

作成した円筒型試料はまず、寸法を測定する必要がある。寸法測定は図 107 図 107 に示すように、ノギスとマイクロメータを用いて行われる。ノギスで全長を測 り、マイクロメータで直径を測定する。直径は三箇所(上端、下端、中心)を測定 して、平均を取る。この際、ノギスやマイクロメータが低温室の室温程度に冷え た状態にする必要がある、室温のまま測定を行うと、図 112 に示すように試料の 損傷 (融解)を招くことになる。

図 113 はテフロンの標準試料を共振器に挿入している様子である。試料を上下 の電極で挟んだ状態で共振器内に収納する。この作業は通常2人で行われる。一 人が、共振器の下の電極を押し上げながら、上の電極を持ち上げ待機し、もう一 人が間に試料を挟む。共振器にはカメラにあるような虹彩絞りがあり、これを用 いて、試料の位置を共振器の中心に来るように調節する。写真中で作業者の親指 が触れているあたりに虹彩絞りのレバーがある。なお、虹彩絞りを用いる際は試



図 109: 測定に用いた氷試料



図 110: ノギスを用いた寸法測定



図 111: マイクロメータを用いた寸法測定



図 112: 外気温の器具と接触し融解した試料。



図 113: 共振器に試料を挿入している様子。

料を電極ごと上下させ、上段、中段、下段の3回絞ることでより、厳密に中心に 合わせることが出来る。



図 114: 低温室の温度変化

図 114 は共振器を設置した低温室 (-30 ℃) の温度変化の様子である。 測定は、測定結果に悪影響を与えないよう、室温が安定した時間帯を見計らって 行う必要がある。図 114 から分かるように低温室は1日に約3回、温度が5℃ほど 上昇する。この為、測定を行える時間が制限され、測定回数が少なくなってしまっ ている。全体の作業を効率よく行うためには、事前に一日の温度変化の様子を予 測し、どのタイミングで測定作業に取り掛かるべきかを判断して一日の作業予定 を立てないといけない。温度変化が大きく測定に不都合な時間帯は、試料加工な どの、あまり温度変化の影響を受けない作業を行い、温度が安定した時間帯に集 中して測定作業を行う。また、あくまで目安であるが、一時間ほどで五本の試料 を測定することが出来る。



図 115: テフロンの誘電率実部

図 116: テフロンの誘電正接 (tanδ)

氷の測定を行う前に、テフロンの標準試料の測定を行い、測定の妥当さを検討 した。その結果を図115、図116に載せる。図115は誘電率実部であり、図116は 誘電正接 (tanδ)である。図中の直線は、他実験において同軸励振円盤共振器法に よって測定された結果である [34]。我々の実験においては、円柱型試料を測定して いるが、直線は平板状試料の測定であり、また、測定に用いた周波数 (8GHz)も異 なっている。我々の測定は、温度は-30℃、周波数は 500MHz と 1GHz において行 われている。測定状況の影響による多少のズレがあるが、おおよそ他の先行研究 と近い値が得られている。
# A.4 設計図



部品名		同軸管	外部導体	本100m	m	材質	[ 銅(材料あり)	
図番	201	30801-4	個数	2	尺度		図法	Δ
組立図面	ī名				設計	者	矢野	浩之
検 図				Ø	) 打ち1	合わせ	要	· 不要
首依頼	都大当 責任者	学東京 首 上條 新 E-mail:y	理 教生内親 ano@hep	目工系 泉4345 omail.ph	電気電 iys.se.tmu	( 会野 ac.jp	学コース 内線332	27)

図 117: WX-20D 同軸管外部導体 電波反射測定用

銅円筒の端から2mm,7mm,12mmの場所におおよそ1mm×2mm程度の穴を開 けてください。楕円でも長方形でも構いません



銅円筒の端から2mm,7mm,12mmの場所におおよそ1mm×2mm程度の穴を開 けてください。楕円でも長方形でも構いません

部品名		同軸管外部導体100mm						ŧ.	銅(材料あり)	
図番	201	30801-4	個数	2		尺度		F	図法	Δ
組立図面	百名					設計	者		矢野	浩之
検図				Œ	D	打ちた	合わせ		要	· 不要
首依頼										

#### 図 118: WX-20D 同軸管外部導体 温度測定用

I			Ink/			
真鍮	$\triangleleft$	矢野	· 表	ĸ	3327)	
	図法		毄	二	野内線	
材質		計者	もわれ	電子工	()	di os un
I	尺度	認	打ち合	電		/s.se.tm
部導体	2			米日	4345	unail.phy
整合内	個数			理	<b>亡</b> 乙線	o@hepi
20 2	-				製	yan:
由管道	808-0			東京	上候	E-mail
	20130	名		都大学	責任者	
部品名	函	組立図面	核図		依頼	







図 120: 同軸管冷却箱上面



図 121: 同軸管冷却箱上蓋



図 122: 同軸管冷却箱底面



図 123: 同軸管冷却箱側面1



部品	品名		同軸管	<b>管冷却</b> 箱	管側面2		材質	A	合金	
义	畢	201	20110624-2		2	尺度		図法	Δ	
組立図面名 SND-1						設計者	谷川 孝浩			
検	図	① 打ち合わせ 要					・不要			
首都大学東京 理工系 物理学コース										
依剌	依賴責任者 千葉 雅美 直通電話 042-677-2500(谷川 内線3327)									
内紛	内線3326 E-mail: chiba-masami@tmu.ac.jp									

図 124: 同軸管冷却箱側面 2



図 125: スペーサー



部品名		冷却箱.	上面固定	反1	材質	A	合金		
図番	20110624-8 個数 2			2	尺度		図法	Δ	
組立図面	組立図面名 SND-1				設計者	谷川 孝浩			
検図	<ol> <li>① 打ち合わせ 要</li> </ol>						要	·不要	
首都大学 依頼責任 内線3326	首都大学東京 理工系 物理学コース 依頼責任者 千葉 雅美 直通電話 042-677-2500(谷川内線3327) 内線3326 E-mail: chiba-masami@tmu.ac.jp								

図 126: 冷却箱上面固定用横板1



部品名		冷却箱。	上面固定	反2	材質	A	合金			
図番	20	110624-9	個数	2	尺度		図法	Δ		
組立図面名 SND-1				設計者	谷川 孝浩					
検図				۵	打ち合わ	わせ 要・不要				
首都大学	首都大学東京 理工系 物理学コース									
依頼責任者 千葉 雅美 直通電話 042-677-2500(谷川内線3327)										
内線3326	i	内線3326 E-mail: chiba-masami@tmu.ac.jp								

図 127: 冷却箱上面固定用横板 2



部品名			冷却箱脚部				材質	A	合金
図 齢	20	0110624-10		個数	4	尺度		図法	Δ
組立図面名			SND-1			設計者	谷川 孝浩		
検図	図					打ち合わ	わせ 要・不要		
首都大学東京         理工系         物理学コース           依頼責任者         千葉 雅美         直通電話 042-677-2500(谷川内線3327)           内線3326         E-mail: chiba-masami@tmu.ac.jp									

図 128: 冷却箱脚部

AI合金 (材料なし)	¥ ⊳	と野浩之	要・不要	コース 5線3327)
材質	N	粘	いた 見	(電子工学 (失野⊅ nu.ac.jp
	医阑	「「「「」」	打ちな	電気 iys.se.tm
やくい	-		<b>(</b>	理工系 源4345 spmail.ph
接続用	個数			致生内 /ano@he
同軸管	30801-5			皆東京 皆上徐 E-mail: >
	2013	国名		都責 大任
部品名	図	組立図	被図	为





図 129: 管接続リング 電波反射測定用

AI合金	図法 △	矢野浩之	要 · 不要	·学コース 野内線3327)
材質		者	合わせ	瓦電子工 (矢] mu.ac.jp
	尺度	影	打ち	電5 Vs.se.t
でい	-		9	里工系 泉4345 pmail.ph
§接続用 自加加工	個数			敏生 内 <del>能</del> vano@he
同軸管	3801-2			東京 上條 E-mail: 1
	2013(	面名		都貢 大任 学者
部品名	図	組立図	被図	を 御 観



図 130: 管接続リング 温度測定用

スタイロフォーム	図法 △	矢野浩之	要 · 不要	「学コース	野内線3327)	
材質		計者	ら合わせ	气電子コ	()	tmu.ac.jp
(9	尺度	設	1±	₩.	Q	hys.se.
イロレオ	10		Ð	理工系	線434	epmail.p
料(スタ	個数				敏生 内	yano@h
ダル試	801-3			東京	上條	E-mail:
1	20130	国名		郡大学	責任者	
部品名	图番	組立図	核図	首	依頼	

内径19.94の円筒に嵌め込み、 外径8.67の棒を内部に通す。 容易に抜けないほどがっちりと 納まる位が良い



図 131: スタイロフォーム







## 図 132: 電子ビーム受リング



図 133: 測定装置回路図

#### A.5 National Instruments 社 LabVIEW 使用方法マニュアル



図 134: NI LabVIEW マニュアル p.2

マニュアルの p.1 は表紙なので省略。

開始する前に、PS\_Controller\_NI\_ELVIS2\_differential\_voltage.VI

Circuit Controller\_NI-ELVIS2 & CompactDAQ\_ver3.02.VI

の2つがPCにあることを確認。

1)PS\_Controller\_NI\_ELVIS2\_differential\_voltage.VIを起動する。

2) 発信機出力が OFF であることを確認し、RSA 及び Specat への入力が殆ど無い ことを確認する。

3) ファイルバー真下にある、矢印の「実行」をおすと、プログラムが作動する。 このとき、の数値欄に出た値を小数点以下3桁までをメモをとり、プログラムを 終了する。



図 135: NI LabVIEW マニュアル p.3

4) 次に、Circuit Controller\_NI-ELVIS2&CompactDAQ\_ver3.02.VI を立ち上げる。 プログラム上部の「ウィンドウ」から「ブロックダイアグラム」を選択し、ブロッ クダイアグラム画面へ移動する。



図 136: NI LabVIEW マニュアル p.4\_1



図 137: NI LabVIEW マニュアル p.4\_2

5) ブロックダイアグラムにいどうしたら、「ELVIS2 Input scope CH0」をダブル クリックする。

6) すると、新しいウィンドウがでるので、そこの「電圧入力設定」、「カスタムス ケール」、「PD 作動増幅」の右にあるレンチのアイコンをクリックし、スケールの 編集画面を呼び出す。



図 138: NI LabVIEW マニュアル p.5

7)Y切片の欄に4)で記録した数値(入力0の状態での値)を入力し設定を完了する。

8) ブロックダイアグラムからフロントパネルに切り替える「Alt+Tab」、あるいは プログラム上部のウィンドウからも切り替えられる。



図 139: NI LabVIEW マニュアル p.6

10) 各種設定を行う。

9-1) ファイル出力先の決定:ファイル出力先の表示窓右にあるフォルダマークを クリックすると「名前を付けて保存」の画面が出現する。ここでファイル名を記 述しないと決定ができないが、ここで設定するファイル名は、ファイル名ではな く保存先フォルダ名となる。

9-2) ファイル名の決定:照射ビーム電流、電圧、誘電体種別、位相追尾 ON、OFF を測定条件に合わせてタブから選択する。欄には手動で記入することも出来る?記 入した名前がファイル名になる。テスト動作の際は適切な名前を考えること。



図 140: NI LabVIEW マニュアル p.7

10) ゼロ調整に関する設定を行う。

10-1) 画面中央右にある「ループ」をクリックする。(ON にすると暗い深緑から黄緑になる。)

10-2) 回路保護 Att のスイッチが OFF(深緑) であることを確認する。 測定装置類に触るときも OFF にしておくこと。壊れる!

10-3) 発信機出力を実験時の出力で ON にし、実験前のテストランを行い、ATT、 PS 類の適切な電圧設定を探る。(楕円の赤丸)

プログラムを実行する際は「実行」(左上の矢印) ボタンを押す。右隣の「連続実 行」は選択しないこと。停止する際は更にその右隣の停止(赤丸) ボタンを押す。 基本的にはメニューバーを操作する。



図 141: NI LabVIEW マニュアル p.8

10-4) 固定減衰器および、位相器の印加電圧を設定する。

楕円の赤丸で示した欄に半角数値で書き込み、Enterを押す。

 $AO_0(Att2,3)10V$ 

 $AO_1(PS2,3)3-5V$ 

AO\_2(RSA Specat Att)0Vを設定する。AO\_0and1 は岩塩と氷で多少異なることが 有る

これだけでは (回路のセッティングの影響もあり) 上手く行かないので微調整を行う。欄の左に三角印があり、0.1V 刻みで電圧を変化させる事が出来る。

10-5) 最終的には左上部にある PS 出力が 3-5V 程度になるようにし、かつ AO\_1 を キリの良い自然数にすること。

10-6) 入力電圧が 0.1V 以下を指し続けるようならば、(回路保護 Att) スイッチを ON にする。



図 142: NI LabVIEW マニュアル p.9

10-7) 回路保護を ON にしても、初期では設定が 0V となっているので、目立った 変化は起きない。三角印を利用して、0.1V づつゆっくりとと上げて行き、10V ま で上げる。

2V を超えたあたりから 0.1V の上昇でも大幅に入力電圧が増加することがある。 入力電圧が RSA や Specat の測定可能な反射電力を超えないように自動零調整を 利用して、極小値に収束させつつ電圧を上げる。

ここまで完了すればビーム照射前の設定は完了。Test 用の記録フォルダから、本 番用のフォルダにデータ出力先を切り替え、適宜、実験条件を変更する。

10-8) 実験本番にはいる前に、プログラムを停止し、PS1 と Att1 の出力電圧を PS の初期値、Att 初期値に入力する。これによって、次回速やかに零調整が行わる。



図 143: NI LabVIEW マニュアル p.10

電子ビーム照射実験時の操作。

ここからの操作は以前の零調整からあまり時間を開けないこと。時間が開いた場 合は再度零調整の手順を行うこと。

ー号加速器のビームエネルギーと電圧の上昇が確認されたら、頃合いを見て、プ ログラムを実行し、零調整を行いスタンバイする。準備が十分であるならば、5秒 程度で零調整は出来る。

11) 振幅測定の場合:電子ビーム照射前に 10 秒ほど零調整を行った後、「ループ」 スイッチを OFF にし零調整を停止する (黄緑から暗い緑色になる)。Att1 と、PS1 の出力電圧が変わらなくなったら、振幅測定のモードとなっている。

12) 位相測定の場合:零調整を行い続ける。

実験後にはバックグラウンドの測定と零調整を兼ねて、零調整を状態でフリーラ ンを行う。

装置に触らないこと。

### A.6 LabVIEW $\overline{}$ \overline{} $\overline{}$ \overline{} \overline{} \overline{} $\overline{}$ $\overline{}$ \overline{} $\overline{}$ $\overline{}$



図 144: LabVIEW ブロックダイアグラム

実験で用いた、LabVIEWのブロックダイアグラム。

LabVIEW はプログラムコードをグラフィカルに描画する事が可能であり、プログラム構造を直感的に理解出来る。

図中のアイコンがプログラムの関数に対応し、また、結線がデータフローに対応 する。長方形の枠はプログラム構造 (for 文など)を表している。 A.7 Tektronix社 Real-Time Spectrum Analyzer :RSA3303B 使用方法マニュアル



図 145: rsa マニュアル p.2

マニュアルの p.1 は表紙なので省略。 1)Mode の下にある S/A を押す。 2) その下にある Time を押す。 3)Setting の下にある Trig を押す。



図 146: rsa マニュアル p.3

4) マウスを操作して (ボタンでも可)Go to page2 を選択

READY	TRIGGER		
	Cancel - Back		
	Save On Trigger (0)		
	Off On		
	Save Count		1.55
	Off On		

図 147: rsa マニュアル p.4

5)Save Count は Off にしておく。On にすると、設定したカウント数 (秒数) で収 録を終了するが、普通は使わない。Save On Trigger を ON にすることによって収 録を開始する。(カッコ) 内部に収録開始からの秒数が出る。経験上 300 秒くらい で終了することが多い。Off で収録終了。

6) 収録が終わったら、マウスを画面下まで持ってゆく。すると見慣れた windows のタスクバーが出てくるので、エクスプローラを立ち上げ、日付と実験番号がわ かるようにフォルダを作成し、生成された iqt ファイルを収納する。実験1回ごと にこの作業を行わないと、複数の実験のファイルが混ざってしまう。

7) 再実験時は今までやった手順を最初から。S/A を押すと (カッコ) 内のカウント が初期化される (0 に戻る) 。