

超高エネルギーニュートリノ検出のための岩塩鉱の探索

近 匡*¹, 近重 悠一*¹, 清水 裕*², 竹岡 義人*³, 天野 晶夫*³,
森 聡史*⁴, 二宮 壮介*⁴, 千葉 雅美*⁵, 上條 敏生*⁵

Search for Suitable Rock-Salt Mine for Detection of Ultra-High Energy Neutrinos

Tadashi KON*¹, Yuichi CHIKASHIGE*¹, Yutaka SHIMIZU*², Yoshito TAKEOKA*³, Akio AMANO*³,
Satoshi MORI*⁴, Sohsuke NINOMIYA*⁴, Masami CHIBA*⁵, Toshio KAMIJYO*⁵

ABSTRACT : Ultra high-energy (UHE) neutrinos ($E > 10^{15}$ eV) is expected to exist due to presence of the cosmic microwave background and UHE cosmic rays implied by Greisen, Zatsepin and Kuz'min (GZK). The low rate of GZK neutrinos requires us to utilize a large mass (50 Gton) of detection medium. Collision between the UHE neutrino and the rock salt produces electromagnetic shower, which includes a huge number of unpaired electrons in rock salt. They would emit sensible radio wave by coherent Cherenkov effect. Attenuation lengths of natural rock salt at 0.3 and 1.0 GHz were measured to know possibility of a salt neutrino detector. The result indicates a feasible plan with economical antenna spacing.

Keywords : High Energy Neutrino, Salt Neutrino Detector, Cylindrical Cavity Resonators

(Received April 12, 2007)

1. はじめに

物質との相互作用が非常に弱い素粒子ニュートリノは、ほぼ光速で宇宙から地球に飛来し遙か遠方に存在する天体の貴重な情報をもたらす。ただしその相互作用の弱さにより地上での検出は容易ではないことも知られている。東京大学の小柴教授らのグループは、3千トンの水を張った検出器「カミオカンデ」を用いて1987年大マゼラン星雲で起こった超新星爆発からのニュートリノを検出し貴重な情報を得た(2002年ノーベル賞受賞)。本研究は、活動銀河核やガンマ線バーストなどの未だ性質が良くわかっていない天体から飛来する(カミオカンデでは検出できない)超高エネルギーニュートリノ(UHE ν)の検出に有望な「岩塩ニュートリノ検出器」開発に向けた基礎研究である。具体的には、世界各地の岩塩鉱から採取したサンプルの電波減衰長を精密に測定することを目的と

する。これにより、飛来したUHE ν と岩塩との反応によって生じる干渉性チェレンコフ電波放射をより有効に観測できるのはどの岩塩鉱なのか、また岩塩鉱内にどのようにアンテナを配置すべきかなどに関する情報を得ることができる。

岩塩鉱の電波減衰長の測定方法には、①: 現地での直接測定, ②: 入手した試料を用いた実験室内測定, という2つの方法が考えられる。我々は、日本には大きな岩塩鉱が存在しないこと、測定精度やコストを考慮し、②の方法により求めることにした。世界各地の天然岩塩試料の他に、人工岩塩、テフロン、デルリンの複素誘電率を、作成した1GHz, 300MHzの摂動空洞共振器を用いて測定し、それらのデータから電波減衰長を求めた。

2. 超高エネルギーニュートリノ

ニュートリノは物質を構成する素粒子の1つで、電荷を持たず中性であるとともに質量も殆どゼロであり、透過力が非常に強く物質とも滅多に反応しないために長年その存在は不明であった。元々ニュートリノは、原子核の β 崩壊におけるエネルギー保存の必要性から、その存

*1: 理工学部教授

*2: 理工学部助手

*3: 工学研究科物理情報工学専攻 2006年度修了生

*4: 工学研究科物理情報工学専攻修士2年次生

*5: 首都大学東京准教授B

在が Pauli により 1930 年に予言されたものである。その後、物質を構成する陽子や中性子、電子、中間子、ハイペロン等 200 種余りの新粒子が次々に発見されていたが、ニュートリノは 1956 年になってようやく原子炉で大量に作られていることが陽電子の観測から間接的に確認された。1964 年に Gell-Mann、また後に小林-益川が、究極の物質として 6 種類のクォーク (u, d, s, c, b, t) と 3 種類のニュートリノを含む 6 種類のレプトン ($e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$) により、すべての物質は構成される事を提示し、矛盾なく現在に至っている。

10^{15} eV 以上のエネルギーをもつ超高エネルギーニュートリノ (Ultra High Energy Neutrino : UHE ν) は活動銀河核、ガンマ線バースト、トポロジカル欠陥等から発生すると予測されている。また、銀河系外から到来する宇宙線 (陽子) の最高エネルギーは 10^{19} eV 以上と言われている【1】。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、陽子を核子共鳴状態に励起する。共鳴状態では π 中間子を放出し、その π 中間子が崩壊して UHE ν を生成する。この過程は GZK 効果【2】と呼ばれ、生成した UHE ν は GZK ν と呼ばれている。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 ν が存在する可能性は高い。宇宙空間はビッグバン由来の CMB で充たされているため、UHE 陽子の伝播距離は GZK 過程でエネルギーを失うので 2 千万光年程度と短い。又、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 ν は相互作用が非常に弱いことから CMB と相互作用せず、宇宙の果て (130 億光年程度) の遠方 (宇宙初期) から飛来することができると考えられている。

3. 岩塩ニュートリノ検出器

3.1 岩塩鉱とは

岩塩は 2 億 5 千万年程前の二畳紀にパンゲア超大陸内の閉鎖された塩水湖が蒸発し地中に埋没して生成されたとされる。その後、岩塩の密度は $2.2\text{g}/\text{cm}^3$ と他の岩石密度 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ より低いので、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 位まで上昇する。生成された直径 3km 位の円筒状の形状は岩塩ドームと呼ばれている。岩塩の生成当時、日本は海中にあり岩塩が生成される環境になかったので、岩塩ドームは日本に存在することは無い。ドイツ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に存在することがわかっている。深度の浅い岩塩堆積層よりも岩塩ドームの方が岩塩純度は高く電波減衰長は長いと期待できる。

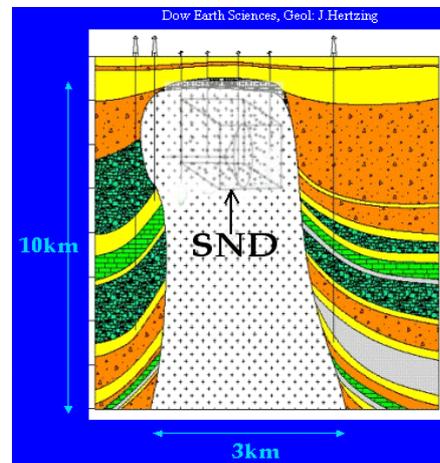


図1 岩塩ドーム

岩塩は気体や液体の透過性が無く、岩塩外部の地下水は岩塩の表面を溶かすのみで内部まで侵入することは出来ない。又、可塑性が高いので割れ目などは直ぐに閉じてしまう【3】。水は電波の吸収が大きいため、透水率がゼロという特性が長い電波減衰長である為に重要である。液体の透過性が無いことから岩塩ドーム周辺に石油を含む母岩が分布しているときは、石油が浮力により岩塩ドーム形成時の地層の傾斜に沿って移動して岩塩ドーム傍に溜まり、その採掘の為に石油井戸が掘られている。

岩塩ドームの上部は通常は土壌に覆われていて、地上の電波の侵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 μ 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可能性は低いと考えられている。上記からもわかるように岩塩はニュートリノ検出器として用いる巨大媒質に適していると考えられる。



図2 Hockley 岩塩鉱試料

3. 2 岩塩ドームでのニュートリノ検出法

岩塩を超高エネルギーニュートリノ検出器の検出媒質として使用することは、1961年にアスカラヤン【2】によって提案された。なおここでは、固体媒質として電波に対する透明度が良い岩塩、氷、月面土壌等が列挙されている。

$\text{UHE}\nu$ は大変低い頻度でしか地球に到達しないと予想されるので、巨大な質量の媒質（岩塩ドーム）を必要とする。アスカラヤン効果により、ニュートリノエネルギーの2乗に比例する強度の電波放射が得られることから、電波の減衰長の長い媒質（岩塩）の中に多数のアンテナを配置することによって $\text{UHE}\nu$ の検出が可能になる。従って、干渉チェレンコフ放射を利用した巨大媒質検出器（岩塩ドーム）は、 $\text{UHE}\nu$ を検出するのに非常に適している。巨大媒質検出器として使用される岩塩ドームに $\text{UHE}\nu$ が入射してきた時に反応を起こし電磁シャワーが発生する。アスカラヤン効果により強められた電磁シャワー内の電子や陽電子が岩塩中の光速を越える事によりチェレンコフ放射を起こす。そのチェレンコフ放射角度は媒質により決まるので入射してきた $\text{UHE}\nu$ の情報（エネルギー、角度、時間）を得ることができ、又、2つの分離したシャワーの存在から τ ニュートリノの選別も可能となる【4】。電波減衰長の長い媒質を検出器として使用できれば媒質内で発生したチェレンコフ放射を少ない数のアンテナによって検出することが可能である。

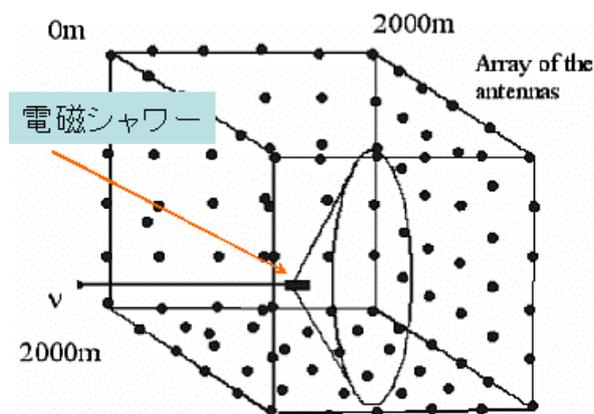


図3 検出器内でのニュートリノ反応

4. 振動空洞共振器での誘電率測定

4. 1 マイクロ波帯における誘電率測定法

マイクロ波帯における誘電材料の複素誘電率測定法は、振動空洞共振器法、S-パラメータ法、誘電体共振器法、自由空間法（基準金属板反射法）がある。自由空間法は、試料反射波の強度減衰と位相差から複素誘電率を求める

方法である。

この方法の特徴は、吸収長の長い試料には大きな試料が必要であり、現地測定にも適応可能である。P. Gorham等は、この方法で岩塩鉱の減衰長の測定を直接現地で行った【5】。一方我々は各地の岩塩サンプルを入手し、振動空洞共振器方法を用いてその複素誘電率を測定した。そして得られた誘電率のデータから減衰長を算出した。

なお、測定する材料によって有効な測定法が異なることが知られている。例えば1GHz帯において複素誘電率の実部が5~10程度、虚部が 10^{-4} 程度の低損失材料の測定を行う場合、振動空洞共振器を用いると精度良く測定可能と判断できる。一方、電波吸収材に使用するような高損失材料の場合は、広い周波数範囲で測定できるS-パラメータ法が用いられる【6】。

4. 2 試料挿入孔のない振動空洞共振器

マイクロ波帯における複素誘電率測定の標準とされている方法は、空洞共振器の中央の電界のみ存在する位置に試料を挿入する前後の共振周波数および共振幅の変化を測定し、複素誘電率を導出する方法である。その際、試料は、共振器の中央に開けた試料挿入孔を通して挿入させるのが普通である。この方法は、試料の挿入過程が簡便だとしてJIS (Japanese Industrial Standards) および、ASTM (American Society for Testing Materials) で採用されている。

しかしながら、空洞共振器の高さがキャビティの直径に比して小さくなると、この試料挿入孔があることにより測定誤差が大きくなることが明らかになっている【7】。今回扱う岩塩の測定においては、長い試料を作製することが困難である（岩塩は脆いため）。また、UHF帯の共振器の直径は非常に大きくなるため、共振器の高さもあまり大きくできない。これらの理由から、試料挿入孔のない空洞共振器が精密な複素誘電率測定に必要不可欠であると考えられる。上野、上條ら【8】は、20年前にX-bandにおいて、試料挿入孔のないシンプルな空洞共振器を提案している。この度、キーコム（株）および馬淵技研の協力により、試料挿入のメカニズムをより使いやすい構造に改善して、1GHzの試料挿入孔のない TM_{010} 共振器を作製した。さらに、岩塩の減衰長が長いと予想される、300MHzの共振器も作製した。

近年、振動空洞共振器は測定過程とデータ修正が簡単であるという観点から再評価されている。また、振動空洞共振器の製作技術も進歩し、測定の精度も改善されてきている。さらに、振動方法の適用限界が共振器の共振モードの厳密な理論解析により明らかにされてきた。こ

のような理論解析を行う場合にも、この挿入孔のない共振器では境界条件もシンプルであるため、解析も容易である。

4.3 摂動空洞共振器法

共振器内に微小な誘電体や磁性体を挿入すると、共振周波数および Q 値がわずかに変化する（図4参照）。この共振周波数や Q 値の変化量を測定し、材料の複素誘電率（および複素透磁率）を測定する方法が摂動共振器法である。以下で複素誘電率 ϵ を、

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$$

と表す（ i は虚数単位）。

摂動空洞共振器法では、微小な誘電体や磁性体の試料を挿入するので、共振器内の電磁界分布が試料挿入の前後で等しいと仮定する。この仮定を用いることを摂動法といい、この仮定に基づいて方形や円筒形の共振器やその共振モードに対して摂動公式（1）と（2）が導かれる。実際の測定では、試料の体積および試料挿入前および試料挿入後の共振周波数と Q 値を測定し、式（1）と（2）を用いて複素誘電率を求める。

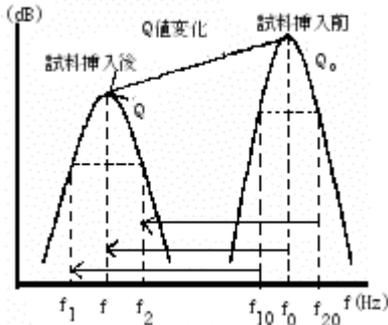


図4 共振周波数とQ値の変化

$$\epsilon' = 1 - \frac{1}{\alpha_\epsilon} \frac{f - f_0}{f} \frac{V}{\Delta V} \quad (1)$$

$$\epsilon'' = \frac{1}{2\alpha_\epsilon} \left(\frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_0} \right) \frac{V}{\Delta V} \quad (2)$$

ここで、

f_0 : 試料挿入前の共振周波数

f : 試料挿入後の共振周波数

Q_0 : 試料挿入前のQ値

Q : 試料挿入後のQ値

α_ϵ : 共振モード，試料形状で決まる定数

V : 共振器の体積

ΔV : 試料の体積

これらの式において、 α_ϵ はモードや試料形状で理論的に決定される定数であり、各種形状の試料に対して α_ϵ が計算される。作製した1GHzと300MHzの円筒TM₀₁₀摂動空洞共振器の写真を図5と図7に、その断面図を図6と図8に示す。

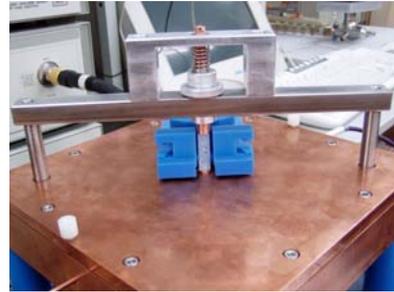


図5 : 1GHz 円筒 TM₀₁₀ 摂動空洞共振器

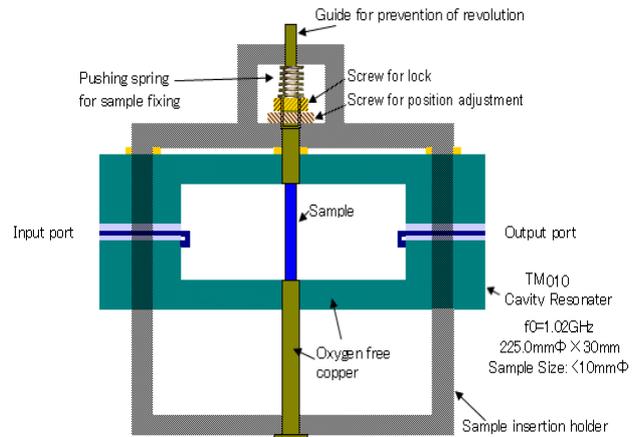


図6 : 1GHz 円筒 TM₀₁₀ 摂動空洞共振器断面図

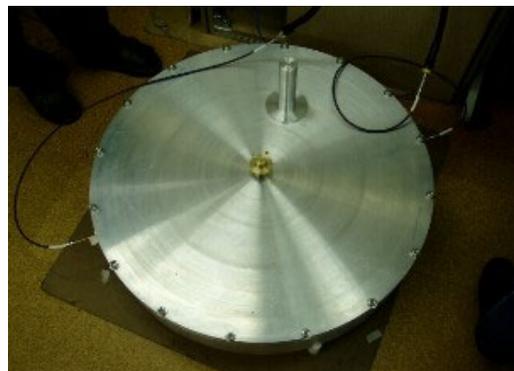


図7 : 300MHz 円筒 TM₀₁₀ 摂動空洞共振器

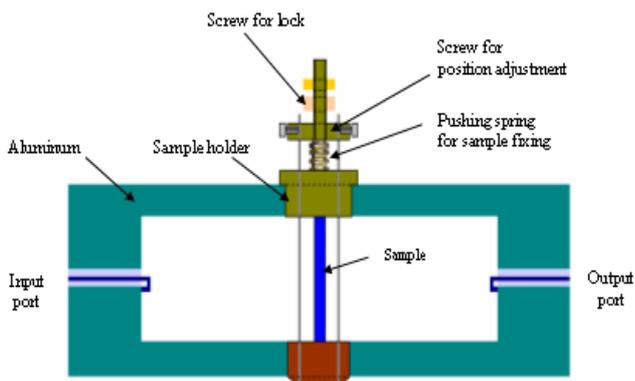


図 8 : 300MHz 円筒 TM₀₁₀ 振動空洞共振器断面図

5. 測定結果

岩塩の測定は、湿度による依存性が見られ、低湿度での測定が必要であった。1GHz での測定は、共振器を

アクリルの箱で覆い、除湿箱で低湿度にして測定を行った。300MHz の測定は、湿度が低い時期に測定を行った。図 5、図 7 の 1GHz、300MHz の試料挿入孔封鎖型振動空洞共振器で測定した複素誘電率から電波減衰長 L を次式を用いて求めた (表 1 参照)。

$$L = \frac{\lambda}{\pi \sqrt{\epsilon'} \tan \delta} \quad (3)$$

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (4)$$

ただし、同じ岩塩鉱でも試料を切り出すところによって、単結晶、多結晶のところがあり、それにより大きく電波減衰長に差が生じた。ここでは、2 標準偏差以上平均値からずれているものを除き、単結晶と多結晶試料に対するデータの加重平均を求めた。

表 1 岩塩資料の電波減衰長

試料	L (300MHz)	L (1GHz)
人工岩塩	855 ± 355 (m)	538 ± 51 (m)
Hockley 岩塩 (USA)	155 ± 22 (m)	242 ± 26 (m)
Zuidwending 岩塩 (オランダ)	23 ± 2 (m)	76 ± 2 (m)
Asse 岩塩 (ドイツ)	255 ± 3 (m)	42 ± 2 (m)
Heilbronn 岩塩 (ドイツ)	41 ± 4 (m)	-----
Ukraine 岩塩 (ウクライナ)	-----	337 ± 4 (m)

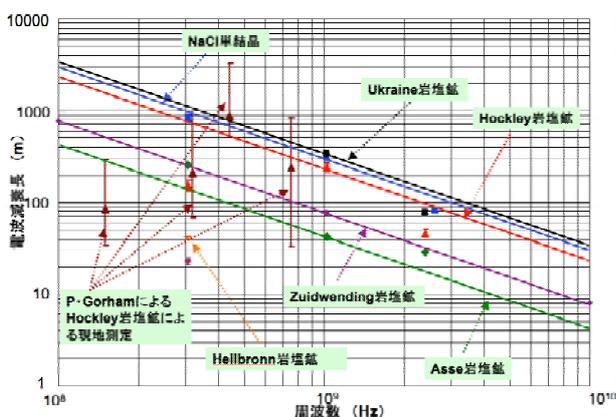


図 9 : 各岩塩鉱試料電波減衰長の周波数特性

図 9 に、各岩塩鉱試料の電波減衰長の周波数特性を示した。ここでは各試料の 1GHz での電波減衰長を基準と

し、 $\tan \delta$ が周波数に依存しないと仮定したときに各測定値が示す直線性も表示した。NaCl 単 (人工) 結晶では、300MHz、1GHz の測定値がこの直線上にあることが確認できる。一方、現地測定で得られた Hockley 岩塩鉱の電波減衰長は周波数依存性があることが知られていたが、我々の測定においても 300MHz で電波減衰長が短くなることが示された。測定を行った試料の中では、この Hockley 岩塩鉱試料と Ukraine 岩塩鉱試料が他の試料に比べて大きな電波減衰長を持つ可能性が高いことがわかった。実際 Hockley 岩塩鉱試料は、1GHz での測定で約 250m の電波減衰長が得られた。その値は岩塩ニュートリノ検出器が必要とする電波減衰長に近い値となる。

6. むすび

摂動空洞共振器を用いて各種岩塩鉱試料の測定を行った本研究では、現地での測定結果に比べ10倍以上の精度で複素誘電率を測定することができた。また摂動公式を用いて従来の下限值ではなく確定値として電波減衰長を算出することができた。Hockley 岩塩鉱試料では、周波数 1GHz において約 250m の値を得た。このような岩塩鉱を用いたニュートリノ検出器を開発できたとするなら、1 年間に約 10 事象の GZK ニュートリノが検出可能となると期待できる。

参考文献

- 【1】 Takeda et al., Phys. Rev. Lett. 81, pp. 1163 - 1166, 1998
- 【2】 G. A. Askar'yan, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 41, pp. 616 - 618, 1961 ; G. A. Askar'yan, Soviet Physics JETP 48, pp. 988 - 990, 1965
- 【3】 T. Machida et al (ed.), 「Topography dictionary」, Ninomiya Book Co. Ltd., Tokyo, p. 110, 1981 ; J. L. Stanley, 「Handbook of World Salt Resources」, Plenum Press, New York, 1969 ; T. H. Michel, 「Salt Domes」, Gulf Publishing Company, Houston, 1979
- 【4】 J. G. Lerarned and S. Pakvasa, Astropart. Phys. 3, p. 267, 1995 ; F. Halzen and D. Saltzberg, Phys. Rev. Lett. 81, pp. 4305 - 4308, 1998 ; H. Athar, M. Jezabek and O. Yasuda, Phys. Rev. D62, pp. 103007-1, 103007-8, 2000 ; H. Athar, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 76, p.419, 1999 ; H. Athar, G. Parente and E. Zas, Phys. Rev. D62, 093010-1, 093010-5, 2000
- 【5】 P. Gorham, D. Saltzberg, P. Schoessow, W. Gai, J. G. Power, R. Konecny and M. E. Conde, Phys. Rev. E62, pp. 8590 - 8605, 2000 ; D. Saltzberg, P. Gorham, D. Walz et al., Phys. Rev. Lett. 86, p. 2802, 2001
- 【6】 橋本修「材料定数測定法」森北出版株式会社
- 【7】 小西良弘「マイクロ波技術講座」日刊工業新聞社
- 【8】 R. Ueno and T. Kamijo, Record of Study, LEL CE., Japan, No. MW87-42. (1987) ; Memoirs of Faculty of Technology, Tokyo Metropolitan University, No. 38, 1988, pp. 3923 - 3933, 1989