

「量子標準体系の高度化に関する研究」

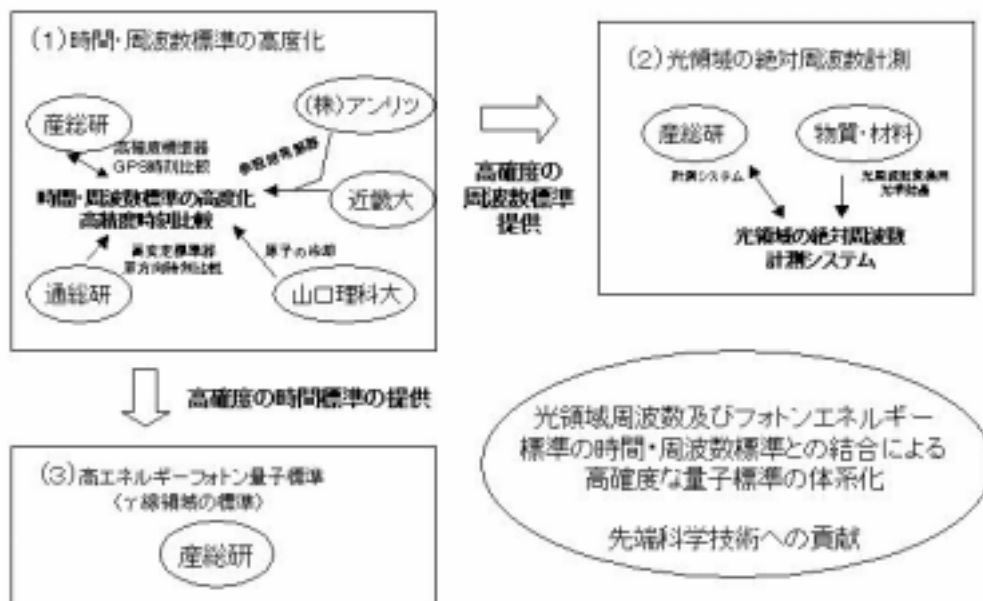
(H10年度～H14年度)

研究代表者 松本弘一(産業技術総合研究所)

研究体制: 産業技術総合研究所 外5機関

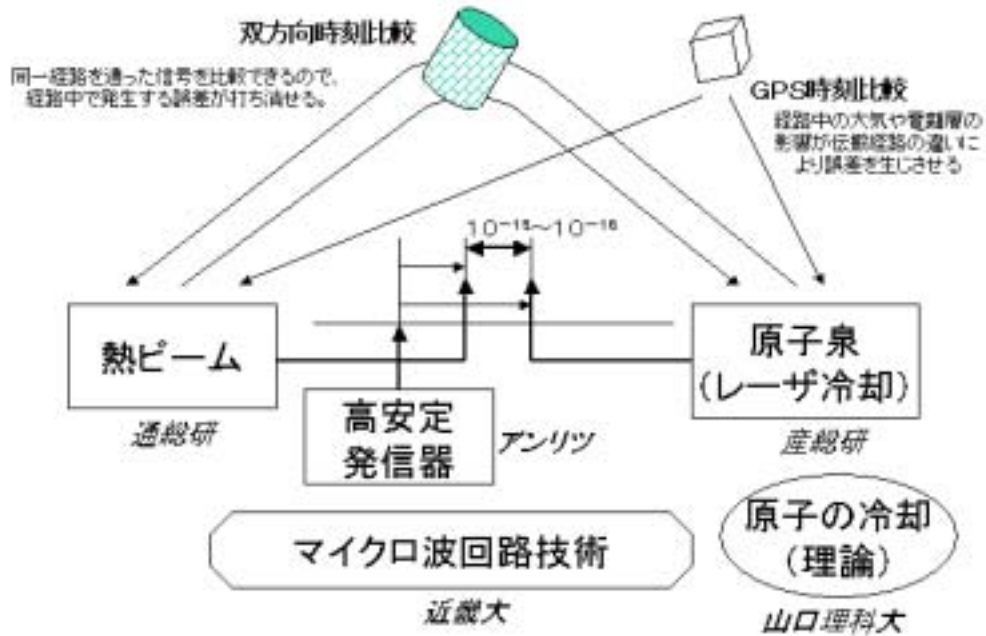
研究の概要・目標	諸外国の現状等	研究進展・成果がもたらす利点
<p>1. 何を目標しているのか 量子標準体系の高度化により、科学技術分野において、先導的な技術開発の環境を整備する。</p> <p>5年目の目標: 高精度時間標準器を用いた時間周波数標準の高度化、高信頼化 高精度標準信号を用いた光領域の絶対周波数計測の実現 高精度標準信号を用いた線領域の標準場発生の安定化の実現</p> <p>2. 何を研究しているのか 量子標準の基本となる時間・周波数標準、光周波数標準、高エネルギーフォトン量子標準を対象にそれぞれの不確かさを低減(1/10～1/100)する技術開発等について研究を行う。</p> <p>3. 何が新しいのか 基本的には標準体系の高度化であるが、新たに原子泉方式の時間周波数標準器の研究や光標準を実現するための光コム技術等の研究を行う。</p>	<p>1. 現状 米国、フランス、ドイツ、日本などで量子標準の研究が進展している。達成している実用的な精度は各国とも同程度であるが、高精度化のアイデアは外国からのものが多い。</p> <p>2. 我が国の水準 時間・周波数標準器に関しては後追い状態。光コム技術等の光周波数変換技術については国際的に評価は高いが、実用には研究の進展が必要。高エネルギーフォトン標準については、放射線の安全性評価のために確立が急がれている。</p> <p>量子標準とは: 原理的に一定不変な量子現象を使って、高精度、高安定、高再現性を有する計測のための標準を実現しようとするものである。</p> <p>光コム技術とは: 周波数が細かく等間隔で並んだ光を発生させる技術。これは任意の2つの光の周波数間隔を測るための物差しに利用できる。</p>	<p>1. 世界との水準の関係 世界的に研究が進展しており、我が国では体系的に研究を進めなければ世界的な水準を維持することが難しくなる。</p> <p>2. 波及効果 量子標準体系を高度化することにより、産業または各種物理計測ための基盤技術として波及効果が大きい。特に大容量光通信、大気微量成分の高感度検出、原子力分野における安全管理などの広い分野での応用が可能である。</p>

「量子標準体系の高度化に関する研究」の研究体制

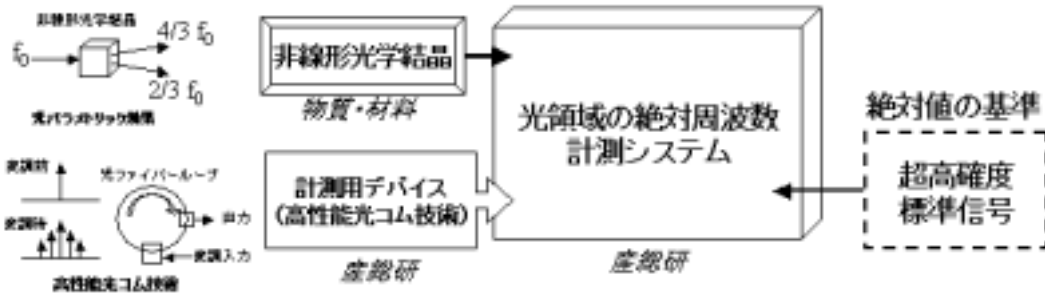


「量子標準体系の高度化に関する研究」

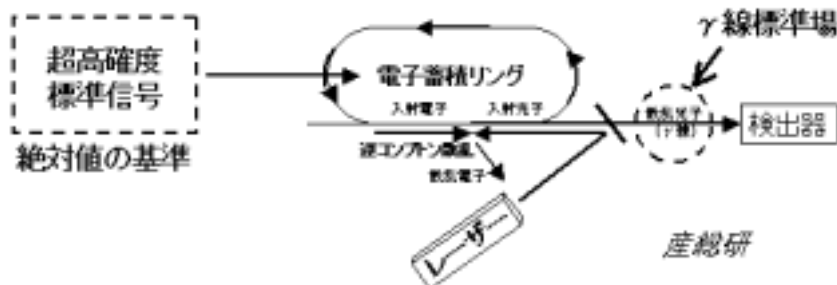
(1) 時間・周波数標準の高度化



(2) 光領域の絶対周波数標準



(3) 高エネルギー光子量子標準 (γ 線領域の標準)



所要経費（期）

（単位：千円）

研究項目	担当機関等	研究担当者	H10 年度	H11 年度	H12 年度	所用 経費
量子標準体系の高度化に関する研究			215,046	203,830	208,941	627,817
1. 時間・周波数標準の高度化に関する研究			122,688	117,125	117,251	357,064
(1) 高精度時間・周波数標準器の研究			84,743	78,825	80,820	244,388
原子泉型時間・周波数標準器の開発に関する研究	工業技術院 計量研究所	大嶋 新一	27,410	26,260	28,449	82,119
高安定型時間・周波数標準器の開発に関する研究	通信総合研究所	森川 容雄	25,136	22,070	19,992	67,198
冷却原子の特性に関する研究	山口東京理科大学	清水 忠雄	7,579	6,742	6,127	20,448
マイクロ波回路技術の高度化に関する研究	近畿大学	中桐 紘治	7,403	7,205	9,231	23,839
参照用発振器の開発に関する研究	アンリツ(株)	津田 正宏	17,215	16,548	17,021	50,784
(2) 高精度時刻比較法の研究			37,945	38,300	36,431	112,676
測地衛星による時刻比較法に関する研究	計量研究所	萩本 憲	12,038	10,960	9,209	32,207
衛星双方向時刻比較法に関する研究	通信総合研究所	今江 理人	25,907	27,340	27,222	80,469
2. 光領域の絶対周波数計測に関する研究			64,450	59,260	63,209	186,919
(1) 光周波数計測システムの研究	工業技術院 計量研究所	池上 健	31,726	28,350	29,413	89,489
(2) 光周波数変換用光学結晶の高性能化	無機材質研究所	北村 健二	19,390	17,850	19,251	56,491
(3) 光周波数計測用デバイスの研究	工業技術院 電子技術総合研究所	土田 英実	13,334	13,060	14,545	40,939
3. 高エネルギーフォトン量子標準に関する研究	工業技術院 電子技術総合研究所	工藤 勝久	27,896	27,150	28,200	83,246
4. 研究推進	工業技術院 計量研究所	松本 弘一	12	295	281	588
合計			215,046	203,830	208,941	627,817

所要経費(期)

(単位：千円)

研究項目	担当機関等	研究担当者	H13 年度	H14 年度	所用 経費
量子標準体系の高度化に関する研究			229,800	211,205	441,005
1. 時間・周波数標準の高度化に関する研究			136,402	128,103	264,505
(1) 高精度時間・周波数標準器の研究			91,556	89,339	180,895
原子泉型時間・周波数標準器の開発に関する研究	(独)産業技術総合研究所 計測標準研究部門時間周波数科 時間標準研究室	黒須 隆行	35,455	54,013	89,468
高安定型時間・周波数標準器の開発に関する研究	(独)通信総合研究所 電磁波計測部門 原子周波数標準グループ	細川 瑞彦	21,998	18,590	40,588
冷却原子の特性に関する研究	山口東京理科大学基礎工学部 電子・情報工学科	清水 忠雄	6,532	4,921	11,453
参照用高安定発振器の高度化に関する研究	近畿大学 生物理工学部 電子システム情報工学科	中桐 紘治	9,128	7,216	16,344
参照用発振器の開発に関する研究	アンリツ(株)研究所 原子時計開発プロジェクトチーム	津田 正宏	18,443	4,599	23,042
(2) 高精度時刻比較法の研究			44,846	38,764	83,610
測地衛星による時刻比較法に関する研究	(独)産業技術総合研究所 計測標準研究部門時間周波数科時間周波数計測グループ	萩本 憲	15,236	12,863	28,099
衛星双方向時刻比較法に関する研究	(独)通信総合研究所 電磁波計測部門 時間周波数計測グループ	今江 理人	29,610	25,901	55,511
2. 光領域の絶対周波数計測に関する研究			63,205	55,369	118,574
(1) 光周波数計測システムの研究	(独)産業技術総合研究所 計測標準研究部門時間周波数科時間標準研究室	池上 健	43,033	38,491	81,524
(2) 光周波数変換用デバイスの研究	(独)物質・材料研究機構 物質研究所 光学単結晶グループ	北村 健二	20,172	16,878	37,050
3. 高エネルギーフォトン量子標準に関する研究	(独)産業技術総合研究所 計測標準研究部門量子放射科 放射能中性子標準研究室	瓜谷 章	30,147	27,489	57,636
4. 研究推進	(独)産業技術総合研究所 計測標準研究部門	松本 弘一	46	244	290
合計			229,800	211,205	441,005

研究成果の概要

総括

第 期においては第 期において得られた要素技術を組み合わせたシステム化の研究が行われたが、それぞれのアローについて期待していた研究成果が十分得られたと考える。時間・周波数標準の高度化に関しては、セシウム原子泉が開発され、高い周波数安定度が得られるとともに、一次標準器としての不確かさを小さくすることができた。共振器自動同調回路を組み込むことにより、水素メーザの中・長領域の特性の改善を行い、高い安定度も得られた。また、遠隔地点に置かれた周波数標準器の高精度比較法として通信衛星を仲介した双方向時刻比較法の研究を行い、アジア・太平洋地域において、時刻比較ネットワークを構築した。さらに、より高精度化を図り利便性を向上するため、多地点間で同時に双方向比較を行い、ほぼ当初の目的を達成した。なお、時刻比較データは既にBIPM(国際度量衡局)のTAI(国際原子時)決定のための時刻比較手段として利用されている。光領域の絶対周波数計測に関しては、光周波数変換用光学結晶の高性能化技術の開発が行われ、並びに、光周波数計測システムの構築とこのシステムを用いたヨウ素安定化Nd:YAGレーザーの光周波数計測が実証された。高エネルギーフォトン量子標準の研究では、電子蓄積リングに高エネルギーフォトン専用ビームラインを用いて、電子とレーザー光との正面衝突領域が長いほど優れた単色性と大きな収量が得られることを明らかにした。

サブテーマ毎、個別課題毎の概要

1. 時間・周波数標準の高度化に関する研究

(1) 高精度時間・周波数標準器の研究

原子泉型時間・周波数標準器の開発に関する研究

原子泉方式の時間・周波数標準器(JF-1)を開発し、従来方式と比較して1桁以上良い、仏・独・米に並ぶ世界トップレベルの周波数安定度($4.7 \times 10^{-13} \text{ }^{-1/2}$)と不確かさ(1.4×10^{-15})を実現した。JF-1では磁気光学トラップを使用し、周波数安定度を損なわずに高い正確さを実現している。これは、産総研が独自に開発した原子密度低減法の採用により衝突シフトが低く抑えられているからである。

高安定型時間・周波数標準器の開発に関する研究

高い安定度を得るために装置の構造を改良し、低速原子集団の発生、原子集団のマイクロ波共振器への導入などを成功させ、1Hzを切る狭い線幅のスペクトル線幅の観測に成功した。

冷却原子の特性に関する研究

従来のイオン化法の欠点を克服するため、電荷移動によるイオン化を実現し、バリウムイオンを共同冷却することができた。

参照用高安定発振器の高度化に関する研究

従来の寸法を約半分にするのが可能なTE₁₁₁マイクロ波共振器内の全域に入れる水素蓄積円筒で、重さが347gと比較的軽く丈夫な水素蓄積石英円筒製作に成功した。

参照用発振器の開発に関する研究

水素メーザに共振器自動同調回路を導入し、短期(<1000秒)での安定度を劣化させずに、中長期の領域(>10000秒)で、 10^{-16} 台の周波数安定度を実現し、高精度な原子標準器を評価することが可能となった。

(2) 高精度時刻比較法の研究

測地衛星による時刻比較法に関する研究

搬送波位相を利用したGPS時刻比較装置を導入して、アンテナの精密位置決定、ケーブルによる信号遅延時間の決定などを行い、本格的な精密時刻自動比較を可能にした。

衛星双方向時刻比較法に関する研究

衛星双方向時刻比較ネットワークの構築がアジア太平洋地域に実現できた。時刻比較結果は、すでに国際度量衡局における国際原子時の決定に寄与している。マルチチャンネル方式双方向時刻比較装置の開発と実用化を達成することができた。 10^{-16} 台(= 数日 ~ 10 日)の周波数比較が可能で実証できた。

2. 光領域の絶対周波数計測に関する研究

(1) 光周波数計測システムの研究

連続波光パラメトリック発振器(cw-OPO)を作成し、777nm から 17687nm にわたる超広帯域の発振を実現した。また、cwOPO を用いた光周波数3分の1分周器と光周波数間隔2分割器を世界で初めて実現した。フォトニック結晶光ファイバーを用いた能動型光周波数群発生を行い、400 ~ 1100 nm の1オクターブ以上にわたる光周波数列を得ることが出来た。これを用いて、産総研所有のよう素安定化 Nd:YAG レーザーの光周波数絶対測定を行って光周波数は 281 630 111 753.4 (0.6) kHz と測定し、メートル条約に寄与した。

(2) 光周波数変換用デバイスの研究

2重るつば法により、分極反転電圧が従来材料より1桁以上低い結晶育成を実現した。従来材料では 0.5mm 厚の姓氏作成が限界であったが、3mm 厚の周期的分極反転構造を持った素子を作成することに成功した。デバイスの厚み、均一性では世界最高レベルに達することができた。また、この技術のベンチャー化を行った。

3. 高エネルギーフォトン量子標準に関する研究

高エネルギーフォトンのエネルギー範囲 4MeV から 10MeV において単色エネルギーを精密に決定し、そのエネルギー広がりが 1.5%から 3%程度であることがわかった。開発されたフォトン標準を用いた NE213 液体シンチレータの光出力の測定により、5MeV 以上では数 10%以上の非直線性を初めて明らかにした。

波及効果、発展方向、改善点等

研究発表などによる普及活動については、個々の研究成果は研究の日常的な活動として国内外の学会誌への投稿、学会での発表、各種委員会等での報告などを通じて普及を行ってきた。

標準供給を通じての普及活動については、標準器の開発・整備の後、以下のような普及活動を行っている。まず、メートル条約関連の活動については、(1)セシウム一次標準器を運転し、国際原子時・協定世界時の校正活動を行う。(2)衛星双方向時刻比較によるアジア・太平洋地域の国際ネットワークを構築し、さらに全地球的高精度時刻比較システム構築に貢献する。(3)各種波長標準の周波数絶対値を測定し、メートル条約に寄与する。(4)高エネルギーフォトンの基幹比較の提案を行い、国際標準化に貢献する。(5)それぞれの諮問委員会等において、成果の報告を行う。この結果、以下の波及効果が期待できる。(1)日本の標準時の高精度化、天文学・測地学等の基礎科学の基盤作りや産業界で用いられる周波数標準器の高精度化等を進める。(2)他の標準に波及させる。(3)高エネルギーフォトン標準場による国内での校正活動を始める。

国際的にも標準の高精度化・高度化が進んでおり、また産業界の安全性確保の立場から高エネルギーフォトン標準場へのニーズも高まっており、当研究課題は益々重要性を増してきている。

発展方向、改善点等については、現在の周波数安定度はマイクロ波合成装置の雑音によって制限されており、今後の改良によりまだ向上する事が期待できる。また、周波数シフトの原因を時間をかけて詳細に調べていくことによって標準器の正確さは不確かさ 10^{-16} 台に向上すると考えられる。今後、短期安定性の向上のためスーパー光スタンダードが必要である。

高精度時刻比較法の研究では、衛星地球局内遅延時間変動の温度揺らぎによる補正などを改良する。今後、光ファイバーネットの利用による大幅な高精度化が予想される。

光領域の絶対周波数計測に関する研究では、当所の目的である光周波数絶対計測が終了した。この技術のコンパクト化を行うとともに、今後、これらの技術を実用長さのためのスーパー測長器へ波及させることが必要である。

研究成果公表等の状況

(1) 研究発表件数

	原著論文による発表	左記以外の誌上発表	口頭発表	合計
国内	第 期 4 件	第 期 14 件	第 期 84 件	第 期 102 件
	第 期 5 件	第 期 10 件	第 期 46 件	第 期 61 件
国際	第 期 35 件	第 期 22 件	第 期 45 件	第 期 102 件
	第 期 23 件	第 期 11 件	第 期 34 件	第 期 68 件
合計	第 期 39 件	第 期 36 件	第 期 129 件	第 期 204 件
	第 期 28 件	第 期 21 件	第 期 80 件	第 期 129 件

(2) 特許等出願件数

第 期 15 件 (うち国内 13 件、国外 2 件)

第 期 3 件 (うち国内 2 件、国外 1 件)

合計 18 件 (うち国内 15 件、国外 3 件)

(3) 受賞等

第 期 1 件 (うち国内 1 件)

1. 大嶋新一:平成14年度文部科学大臣表彰

第 期 1 件 (うち国内 1 件)

1. 伊藤宏之:第14回(2003年春期)応用物理学会「講演奨励賞」「一次周波数標準器用高精度参照標準の構築」2003.5.7.

(4) 主な原著論文による発表の内訳

* 発表者氏名:「発表題目」,文献名,巻(号),頁,(掲載年)の順

国内誌 (国内英文誌を含む)

1. K.Fukuda, A.Hasegawa, M.Kajita, T.Morikawa:「Time-ofFlight Signals from Polarization -Gradient -Cooled Atoms」, Jpn. J. Appl. Phys., **38**, 936-937, (1999)
2. M.Nakamura, S.Higuchi, S.Takekawa, K.Terabe, Y.Furukawa, K.Kitamura:「Refractive indices in undoped and MgO-doped near-stoichiometric LiTaO3 crystals」, Jpn. J. Appl. Phys., **41**, L465-L467, (2002).

国外誌

1. T.Kurosu, Y.Fukuyama, Y.Koga, S.Ohshima:「Characteristics of the Cs fountain frequency standard at NMIJ/AIST」, Proceedings of the 6th Symposium on Frequency Standards and Metrology, 478-479, (2001).
2. T.Kurosu, Y.Fukuyama, K.Abe, Y.Koga:「Measurement of a weak magnetic field using a cold atoms」, Jpn. J. Appl. Phys., **41**, L586-L588, (2002).
3. T.Hasegawa and T.Shimizu:「Limiting temperature of sympathetically cooled ions in a radio-frequency trap」, Phys. Rev. A, **67**, 013408-1-4, (2003).
4. T.Hasegawa and T.Shimizu:「Resonant oscillation modes of sympathetically cooled ions in a

- radio-frequency trap」, Phys. Rev. A, **67**, 013404-1-5, (2002).
- 5 . M.Imae, M.Hosokawa, K.Imamura, H.Yukawa, Y.Shibuya, N.Kurihara, P.T.H.Fisk, M.A.Lawn, Z.Li, H.Li, Y.Nakadan, K.Hagimoto: 「Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer Networks in Pacific Rim Region」, IEEE Trans. Instrum. Meas., **50**, 559-562, (2001).
 - 6 . S.Slyusarev, T.Ikegami, S.Ohshima: 「Phase-coherent optical frequency division by 3 of 532 nm laser light with a continuous-wave optical parametric oscillator」, Opt. Lett., **24**, 1856-1858, (1999).
 - 7 . S.Slyusarev, T.Ikegami, S.Ohshima: 「Continuous-wave RbTiOAsO₄ optical parametric oscillator in optical frequency interval divider scheme」, Jpn. J. Appl. Phys., **40**, 134-136, (2001).
 - 8 . Y.Furukawa, K.Kitamura, A.Alexandrovski, R.K.Route, M.M.Fejer, G.Foulon: 「Green-induced infrared absorption in MgO doped LiNbO₃」, Appl. Phys. Lett., **78**, 1970-1972, (2001).
 - 9 . K.Kitamura, Y.Furukawa, K.Niwa, V.Gopalan, T.E.Mitchell: 「Crystal growth and low coercive field 180 ° domain switching characteristics of stoichiometric LiTaO₃」, Appl. Phys. Lett., **73**, 3073-3075, (1998)
 - 10 . K.Kudo, N.Takeda, H.Ohgaki and H.Toyokawa: “A laser Compton-scattered photon source for potential calibration of gamma-ray detectors in the energy range from 2 to 22MeV,” Proceedings of Reactor Dosimetry, ASTM STP **1398**, 721-728, (2000).

(5) 主要雑誌への研究成果発表

Journal	Impact Factor	サブテーマ 1	サブテーマ 2	サブテーマ 3	合計
Applied Physics Letters	3.03	0	4	0	4
Physical Review A	2.76	3	0	0	3
Applied Physics B	1.39	1	0	0	1
Journal of Crystal Growth	1.26	0	1	0	1
Japanese Journal of Applied Physics	1.26	2	2	0	4
IEEE Transactions on Nuclear Science	1.05	0	0	1	1
IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements	0.61	3	0	0	3
Ferroelectrics	0.44	0	2	0	2