

計量法における型式承認に用いる電磁波障害試験設備の 紹介と今後の課題

福崎知子*, 原田克彦*, 三倉伸介**, 根田和朗***

(平成 24 年 4 月 4 日受理)

NMIJ test facility used for the tests on the immunity to radiated electromagnetic interference in radio-frequency for the instrument type approval at the measurement law

T. Fukuzaki, K. Harada, S. Mikura, and K. Neda

計量法*¹における電磁的環境試験は、平成5年の改正時に電子回路を有する特定計量器*²に対して導入されたイミュニティ試験である。その目的は、妨害に耐えるか、又は計量を中止するなどの対処により誤計量を防止することである。近年、携帯電話など通信機器の増加や電子機器の開発の向上により、国際規格(IEC規格)における規制周波数範囲の拡大を中心として改訂が著しく、これらの規格改訂に対応するため平成18年に電磁波障害試験設備を改修した。主な改修点は、IEC 61000-4-3:2002 (JIS C 61000-4-3:2005)*³に準拠した仕様(周波数上限が2 GHzに拡大された)への適合を主体に、作業性改善も図った内容となっている。具体的には、対応周波数範囲の拡大のために1 GHz以上の周波数帯域での照射電波の電界均一性が得られるように電波暗室壁面にフェライト電波吸収体を追加貼付し、電波照射用アンテナも更新して対応周波数範囲を拡大した。作業効率の改善については、更新したアンテナとして単一の広帯域アンテナを採用して作業内容の効率化を図り、測定環境の整備も実施した。当該規格に準じた測定法により拡大した周波数範囲を含む全周波数範囲において照射電波の電界均一性の規格適合を確認し、加えて効率化施策を実施して試験時間がほぼ半減するなどの効果を上げ、設備改修の目標を実現した。また、当該規格の推奨する方法以外で、照射電波の電界均一性を満たす条件の選定方法を試行し、当該規格の電界強度に比較して強すぎない電界強度をイミュニティ試験に使用する可能性を示した。

計量法*¹: 計量の基準を定め、適正な計量の実施を確保し、もって経済の発展及び文化の向上に寄与することを目的とした法律。

特定計量器*²: 「計量法」によって規定された計量器で、取引若しくは証明における計量に使用され、又は主として一般消費者の生活の用に供される計量器のうち、適正な計量の実施を確保するためにその構造又は器差に係る基準を定める必要があるもの。

IEC 61000-4-3:2002 (JIS C 61000-4-3:2005)*³

: 放射無線周波電磁界イミュニティ試験。携帯電話や無線送信機などから放射される電磁ノイズを模擬し、被試験器物に与えて、その影響の有無を評価する試験の方法について記載されている。

1. 背景

計量法は「計量の基準を定め適正な計量の実施を確保し、もって経済の発展及び文化の向上に寄与することを

目的」(第1条)として制定されていることから、正確な計量器の供給・取締を主な役割とすることに加えて社会基盤の整備、経済の発展と文化の向上にも役立っている¹⁾。はかり、タクシーメーター、血圧計、体温計、水道メーター、ガスメーター等、人の安全・取引の安全に大きく関わる計量器は、特に正確に計量されなければならないと、具体的に計量法に定められている。産業技術

* 計測標準研究部門 法定計量技術科

** 計測標準研究部門 計量標準技術科 型式承認技術室

*** 計量標準管理センター 計量研修センター

総合研究所計量標準総合センター（以下、NMIJ）は、法定計量の技術面における管理を担当している。

1.1 検定と型式承認

計量法において特に正確に計量されなければならない計量器を特定計量器といい、計量法施行令第2条で定められている。取引、又は証明における計量にこれらの特定計量器を使用、又は使用に供するために所持するには、検定に合格して検定証印が付されていなければならない。この検定とは、特定計量器の「構造」と「器差」について基準への適合性を評価し（以下、基準の適合性評価）、「構造」と「器差」の基準を満たすことによって合格し検定証印が付される制度である。つまり、検定とは計量器の使用についての規制の実効性を支える重要な制度となっている。

特定計量器の検定合格条件は、先に述べたとおり特定計量器の構造、及び器差がそれぞれ一定の基準に適合することであるから、特定計量器の検定としてその通りに運用すると検定者は申請のあった計量器の全てについてその構造及び器差を検査することになる。しかし、構造の検査のうち耐久性があるかどうかの評価や電磁的妨害に対する耐性の評価など手順が多く時間がかかる試験が必要な計量器について、個々に十分評価することは時間的、物理的に不可能な場合が多い。典型的なケースは、これら評価項目の中には極めて長い時間を必要とするので多くは実施できない場合や、破壊試験に至ってはそれらを実施することによって対象品が使用不能となってしまうので、全品検定の実施が無意味となるような場合である。そこで、最初はまず構造に係る評価のみについては型式承認の制度として別途定めることとした。検定の申請の際には構造の評価については型式承認を取得していれば省略し、他の性能及び器差の検査は個々に行って性能及び器差の検査が基準を満たせば合格とする合理的な制度を採った。

この制度は昭和41年の計量法改正時から導入され、一部の特定計量器を除いてNMIJが型式承認業務を担っている。メーカーが本格的な製造を開始する前にNMIJは特定計量器の構造が計量法で定められた技術基準に適合するか否かの試験を実施し、その計量器を型式として承認する。各特定計量器の型式承認試験は、試験法、及びその合格基準が、特定計量器検定検査規則（以下、検則）に定められている。現在、その試験項目には計量に直接係わる性能の試験のほか、その性能を保持するために電氣的ノイズ試験などの電磁的環境試験や耐久試験も含まれる。

1.2 NMIJの国際計量機関への取り組み

国際計量機関のひとつとして国際法定計量機関（International Organization of Legal Metrology, 以下OIML）が存在する。法定計量規則を制定することにより計量器や計量器を使用した取引などの国際貿易の円滑化を図ることを目的として、1955年、パリでOIML条約が締結された。我が国はこのOIMLに1961年より加盟している。このOIMLでは、商取引、健康、安全、環境分野等で使用される計量器の国際勧告を作成しており、①計量・技術要求事項、②試験方法、③試験報告書の書式で構成されている。加盟国は国際勧告を可能な限り国内法規に取り入れる調印責任がある。このような背景により、現在の我が国の検則においては最大限の国際整合性を視野に入れた技術基準となっており、電磁的環境試験に関しても最新のIEC規格を採用しつつある。従って、型式承認試験を実施するNMIJとしては、IEC規格に準拠した設備を整備することが求められている。

また、我が国はOIML適合証明書の発行業務を担っており、NMIJは、国際的な証明書発行機関となっている。具体的には、OIML R76 非自動はかり、OIML R117/118 自動車等給油メーター、OIML R115 最高温度保持機能付体温計のOIML適合証明書発行業務のため、国際規格に準拠した設備を整え、国際ルールに従った適合性評価を行っている。

1.3 電磁的環境試験

電磁的環境試験は電子回路を有する特定計量器に対する試験項目であり、前述の型式承認のひとつとして平成5年から計量法に導入されている。この試験には、以下のような試験項目が含まれている。

- (1) 温度試験, 湿度試験
- (2) 電源の電圧もしくは周波数の変化, 瞬時的な電源電圧の低下試験,
- (3) 静電気放電試験,
- (4) インパルスノイズやバーストノイズなどの衝撃性雑音試験
- (5) 電磁波障害耐性試験
- (6) 雷サージ試験
- (7) 外部磁界試験

これらの試験項目は、特定計量器自身が妨害に耐えるか、又は計量を中止するなどの対応を行う能力を備えることにより誤計量を防止することを目的として盛り込まれ、電磁環境的分類ではEMS (Electromagnetic Susceptibility, または電磁耐性,) の程度を試験する、イミュニティ試験である。電磁環境規制のもうひとつの面

は、電子機器が雑音信号を放射して他の機器の動作を妨害する危険を規制するために、試験レベル以上の干渉波源となる電磁妨害（EMI、電磁妨害放射）波の強度を測定する試験があるが、これは法定計量の試験項目には含まれない。このように、EMCは図1に示すように2面性があるが、法定計量では計量器が誤動作をしないことが重要視されている。

NMIJが型式承認を実施する特定計量器のうち非自動はかりではほぼ100%、流量計類では約50%が電子回路を有しているため、イミュニティ試験は型式承認において必要不可欠な試験項目となってきている。流量計関連においては電子回路を有する計測器が増加する傾向にあり、今後、その量は70%にも達すると予測される。

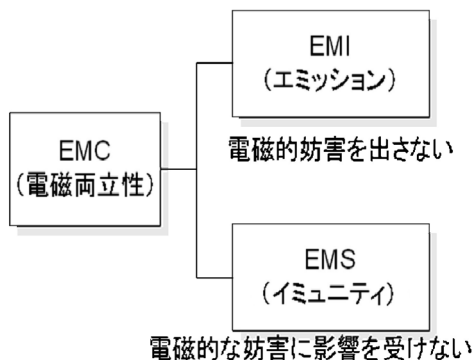


図1 電磁両立性の分類
(計量法では、EMS（イミュニティ）のみ適用することになっている。)

2. IEC規格の改訂動向

法定計量では、電磁的環境試験のうちイミュニティに関連する試験のみが必要とされるので、前項の(5)電磁波障害耐性試験の設備が主要試験設備である。我が国の産業にとって輸出が重要な位置を占めることから、この試験の国際整合性は重要である。このため、試験設備も国際規格（IEC規格）に則った準備がなされており、イミュニティ試験を規定するIEC 61000-4-3の国際規格に基づいている。

最近、国際規格（IEC規格）が適用される周波数範囲が拡大される改訂が行われたために、これに合わせて設備を改修する必要が生じた。IEC61000-4-3電磁波試験の最高周波数の推移を図2に示す。

図2の示すように、イミュニティ規制の最高周波数は1983年の500MHzから約20年後の2002年には、2GHzに高くなっており、更にその4年後の2006年には6GHzまで上がっている。この推移実績を見る限り、今後

も規制周波数の上限は高くなると予測される。規制上限周波数がより高くなる要因としては、携帯電話やETC（Electronic Toll Collection System）などの電波の個人利用の広がりがあり、より高い周波数の電波を発する機器等が場所を限定されずに利用されるようになってきた状況が考えられる。

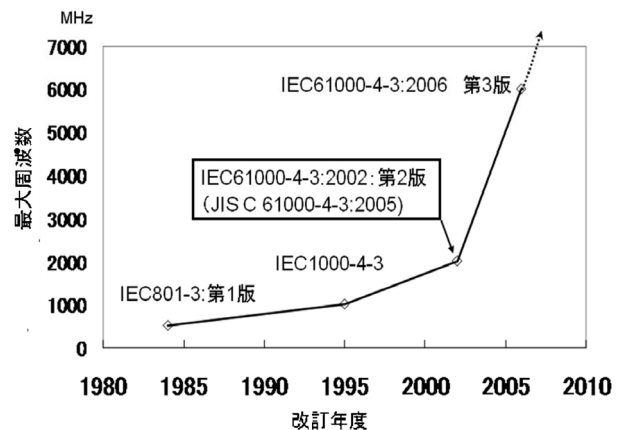


図2 IEC規格の改訂動向（イミュニティ規制の最高周波数の推移）

3. 電磁環境測定設備の改修

当科で管理する電波暗室とイミュニティ試験設備は平成5年度に新設された設備であり、当時IEC801-3第1版に準拠した設計で建設された。その仕様は、最高周波数が1GHzで、最大電界強度値が10V/mであるなど、IEC 61000-4-3:2002²⁾（JIS C 61000-4-3:2005³⁾）に準拠していなかった。前項に記したように周波数範囲を拡大し改訂された国際規格に準拠してイミュニティ試験を実施できるように、この改修の主目的は対応周波数の上限を2GHzまで拡大することである。これには、

- ①既存の電波暗室のシールド性能の周波数範囲の確認、
- ②電波暗室壁面の電波吸収体の改善、
- ③電波照射用アンテナの周波数範囲の拡大

を実施した。ここで、改修後の電磁環境測定設備の概要を図3に配置図として示す。この改修の結果、試験設備の改訂された国際規格への整合性の確認はイミュニティ試験と型式承認業務に重要な意味をもつため、性能評価の測定を実施した。次に、それぞれの改修に関する内容と効果を記述する。加えて、イミュニティ試験は被試験器物の動作を継続しながら実施することになるため、可能な限り短時間での試験を目指して作業性の改善を同時に行った。

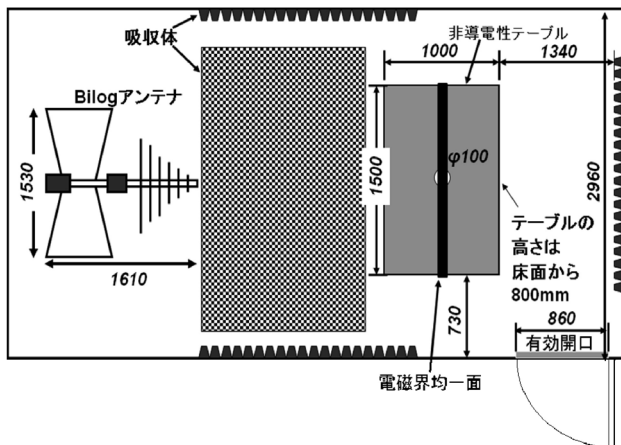


図3 電波暗室内の測定装置の配置図

3.1 シールド性能

イミュニティ試験用の電波暗室では、規定の電界強度を発生させるため比較的大きな電力で電磁波が放射されるので、作業者の安全性という観点ではそのシールド性能は重要である。電波暗室全体のシールドは金属板を溶接、またはハンダ付けされた構造により実現されており、使用周波数範囲ではそのシールド性能は維持されていると考えられる。しかし、開閉機能を伴う電波暗室の扉付近では電磁波漏れの可能性があるため、この部分に関して周波数範囲を拡大した1 GHz以上におけるシールド性能の確認作業を実施した。これはMIL-STD-285⁹⁾に準じてシールド性能の評価を行ったもので、その具体的方法としては、電波暗室のドアを開けた状態での電磁波受信レベルを基準として、次にドアを閉めた状態での電磁波受信レベルの減衰量を測定する。測定周波数としては、1 GHzから3 GHzまで0.1 GHzステップの周波数点で計測した。実測された遮蔽減衰量は、ほぼ80 dB以上あり、安全の面で特に支障がないと確認した。

3.2 周波数範囲の拡大と効率化

3.2.1 電波暗室壁面の電波吸収体

改修前の対応周波数範囲は、IEC61000-4-3:2002第2版(JISC 61000-4-3:2005)以前の規格に準拠して26 MHz～1 GHzであり、この性能は内壁全面に貼付された平面タイル状のフェライト電波吸収体により実現されていた。前述のように3 GHzまでのシールド特性が確認できていることから、既存の電波暗室の基本構造を変更せず、2 GHzまでの周波数に対応する楔形電波吸収体を追加貼付することにより電波暗室の使用上限周波数を2 GHzに拡大した。電波吸収体の貼付位置は、イミュニテ

ィ試験のみの使用目的であるため、その必要な性能を満たすために最小限の量を適切に配置した。具体的な配置は、図3に示すように、電波吸収体を壁面並びにアンテナとテーブルの間に設置した。楔形電波吸収体は、30 MHz～3 GHz程の帯域で吸収率が高い特性を持ち、高さが約80 mmの酸化鉄を主成分とするフェライト製である。アンテナとテーブルの間の天井部分には、将来の周波数拡張にも備えて、3 GHz以上の周波数帯域にも使用できるカーボン混合のポリプロピレン発泡成形のピラミッド型吸収体を採用した。これらの吸収体を床・天井・壁面の反射に寄与する位置に重点的に用いることにより、2 GHzまでの周波数帯に対する測定面の電気特性の改善を行った。改修後の性能は、4.2項に示すとおりである。

3.2.2 電磁波照射用アンテナと信号発生器(送信機)

改修前の設備においては、200 MHzを境として低域周波数範囲をバイコンカルアンテナにより、また、1 GHzまでの高域周波数範囲をログペリオディックアンテナで2本のアンテナにより試験の周波数範囲をカバーしていた。周波数範囲の拡大に伴い1 GHz～2 GHzの周波数範囲に使用できるアンテナの追加が必要になる。最も簡易な方法としては、1 GHz～2 GHzのみに使用するアンテナを追加すればよい。しかし、アンテナ交換には、アンテナからケーブルを取り外して交換するか、同軸スイッチのような切り替え回路を挿入して使用することになり、イミュニティ試験の場合には、ある程度の大電力を扱うことから電力増幅器の制限もあって電力ロスを極力避けるため、従来から採用してきた方法はコネクタの着脱による切り替え方法であった。この場合にはコネクタの接合部分の劣化による接触不良などが生じやすく、さらに、交換する回数が多くなればなるほど試験時間も長くなり、効率が悪いという問題もあった。周波数範囲の拡大、接続コネクタの劣化防止、試験の効率化の3点の課題に対応する方法として、26 MHzから2 GHzまでの周波数領域に使用できる単一のアンテナを導入した。これにより後述のようにイミュニティ試験の規定された電界均一性を達成し、試験時間の大幅な短縮を実現した。

なお、近い将来には2 GHz以上の周波数についても、試験の実施という課題が予想されるが、今回導入したバイログアンテナでは短波長領域での指向性が高く、規定の試験領域での電界均一性が実現できないことから、別途、適合するアンテナを準備が必要である。その場合、電波暗室の均一面の条件も考慮した検討が必要である。

3.2.3 その他の作業効率の改善点

イミュニティ試験に使用する電波暗室とアンテナ以外の主要な設備としては、信号発生器と電力増幅器がある。これらに関しては、周波数帯を拡張した1 GHzを超える電力増幅器を追加することで、既存の設備を活用している。

一方、これまで使用していた測定装置のうち電界強度測定用の電界センサについては特に試験に必要な電氣的性能としての問題は無いが、電源が充電式の電池駆動であるため、試験に際しては用いる前に必ず充電が必要となった。この前準備の充電時間に8時間以上を必要とし、さらに電池が劣化しておらず完全充電したとしても使用できる時間が約8時間と限られていることから、試験実施の作業効率の低下を招く原因の一つであった。そこで、この充電式電界センサから、電界強度計の指示計と通信線である光ケーブルから電源供給を受ける充電が必要のない電界センサへ切り替えた。この電界センサは、電界面の電界強度の均一性評価をする際に使用すると共に、イミュニティ試験を実施する際、被試験器物付近における電界強度値をモニターするために用いる。当電界センサは、大きさとして50 mm × 50 mm × 50 mm程のもので、電源は電界強度計の指示計から供給を受けるため、電源は一体型となっている。以上のことから、被試験器物に対して反射等の影響はほとんど無いと思われる。

図3に示すように1 GHz以上の反射対策のために追加設置した楔形電波吸収体の色は含まれるカーボン粒子のために黒色であり、電波的な吸収性能を持たせたことにより可視光の領域でも反射が少ない。よって、電波暗室内部の作業の際に使用する照明が壁で吸収されてしまい照明効率が悪く、暗室内が暗いという不具合が生じた。暗室内において十分な明るさを確保できない場合には、試験対象の一つであるバックライトのない表示器を有する電子式水道メーターなどの被試験器物の状態を確認するのが困難となる。そこで、電波の反射が少なく電界強度分布への影響が少ない白色の発砲スチロール板を用い、電界強度分布への影響を抑えつつ黒色の吸収体部分を覆うことによって光の吸収を低減させた。加えて、暗室内の天井の電波的影響のない位置4カ所にライトを追加し、作業性を高めた。これらのライトは照射方向の調整が可能であり、発熱も少ない。以上の改善を施して照明効率を保持した。

4. 試験用電界強度分布の評価と改善

イミュニティ試験の規格である IEC 61000-4-3 : 2002

第2版 (JISC 61000-4-3 : 2005) の要求する重要な技術条件は、当該規格に規定されている試験空間において照射する電界強度の均一性である。電界強度分布の規定は規格書に記述されているように、空間に16個の格子点 (図4を参照) を想定し、その格子点において測定された電界強度の75%が0 dB ~ 6 dBの範囲内 (以下、0 ~ 6 dBの許容値内) に入っていることをもって電界強度分布の均一性が認められる。電波暗室の改修後に試験空間の電界分布測定を行い、IEC 61000-4-3 : 2002 第2版 (JISC 61000-4-3 : 2005) の規定に基づく均一性の評価を行い、型式承認に供されるイミュニティ試験に使用する試験装置としての性能改善と確認を行った。

4.1 測定、及び調整方法

試験電界面の電界強度の均一性の測定評価は IEC 61000-4-3 : 2002 第2版 (JIS C 61000-4-3 : 2005) の規格に含まれる方法に準拠して実施した。この規格の試験方法において規定される試験電界面の格子点の位置を図4に示す。この測定面の電界強度は各格子点の位置で測定される。許容電界強度条件は、1%の増分で周波数が設定される複数の周波数点において、16個の格子点のうち75% (12個) 以上の点での電界強度測定値が設定電界強度の0 ~ 6 dBの許容値内にあることである。この条件を満たす具体的な方法は12個の格子点の選択と進行波電力の設定であり、これらについては IEC 61000-4-3 : 2002 第2版の「6.2 Calibration of field」の項に、または JIS C 61000-4-3:2005 の「6.2 電界の校正」の項に記述されている。この JIS C 61000-4-3:2005 には2種類の電界面の測定及び調整方法が推奨されている。ひとつめは格子点での測定電界分布が規定に準拠するように進行波電力を調整する方法であり、他方は、進行波電力は一定のまま電界センサにより空間電界の均一性を計る方法である。このうち後者の「電力一定校正法」を採用して測定を行い、当該規格に準拠する電界分布を実現するための進行波電力を求め、さらに実際にその電界を測定して確認した。実際の測定条件を記す。

- ・周波数範囲：26 MHz ~ 2 GHz (測定周波数点は、周波数の1%増分による1.01の等比数列であり、全測定点数は、438点である)
 - ・電界分布の均一性測定の設定電界強度：5 V/m
 - ・アンテナ偏波：水平、及び垂直
 - ・電界評価領域：図4の通り
 - ・照射距離：3 m
(アンテナ先端と均一電界領域の中心間)
- 使用した電界強度センサの大きさは、50 mm × 50 mm ×

50 mm 程度のもので、その測定能力は、ISO/IEC 17025 に基づく認定を受けた試験所による校正を受けている。このセンサによる電界強度測定値の $k=2$ の拡張不確かさは 0.7 dB で、電界強度の均一性に対する規定である 0 ~ 6 dB の許容条件に対してほぼ 1/10 程度である。

電磁波試験設備に求められる仕様のうち、電波暗室内の均一性評価に加えて、測定された電界の強度分布をもとにイミュニティ試験における電界強度の試験レベルを実現するためのアンテナ励振電力を算出し、送信機の出力電力、及び伝送路の減衰量の評価によりその進行波電力の実現の可能性の判断が必要となる。

その作業手順を以下に示す。

1. アンテナの利得変動や周波数帯による増幅器の切り替えなどにより電界強度が周波数の変化に伴って変動するため、測定においては全格子点の電界強度が設定電界強度付近の値となるように、適当な格子点 1 点を選択し、その位置において設定電界強度となるように周波数ごとの進行波電力を調整する。
2. 全周波数において 16 個の格子点の電界強度を測定する。
3. JIS C 61000-4-3:2005 の「6.2.2 電力一定校正法」に従い、各測定周波数において 16 個の格子点の電界強度の数値を小さいほうから昇順に並べ、設定電界強度を基準として偏差をデシベル (dB) で計算する。最小値を基準として、少なくとも 12 個の数値が 0 ~ 6 dB の許容値内であるかを確認する。12 個の測定値が 0 ~ 6 dB の許容値内に入っていない場合、最小値を外し次の値を基準に同様に確認作業を行い、条件に適合するまで繰り返す。これらの作業を行い、12 個の格子点を選択する。
4. 各周波数で 5 回の試行の可能性があるが、この範囲で条件に適合する 12 点以上の格子点の組が存在しない場合には、周囲反射の状態を改善する必要がある。
5. 周波数毎にこの条件を満たす 12 個の測定点が決まれば、これら 12 個のうちの最小電界値を試験レベルの規定値 (例えば 5 V/m) になるような進行波電力を求める。この最小電界値を規定値に持ち上げるため進行波電力を増加させる必要があるため、その電力値が装置により実現できるか否かを確認し、可能であれば完了する。確認のため、再調整された進行波電力によりすべての周波数範囲において校正した格子点における電界強度を測定する (この時点で、試験に使用する電界強度分布が得られる)。

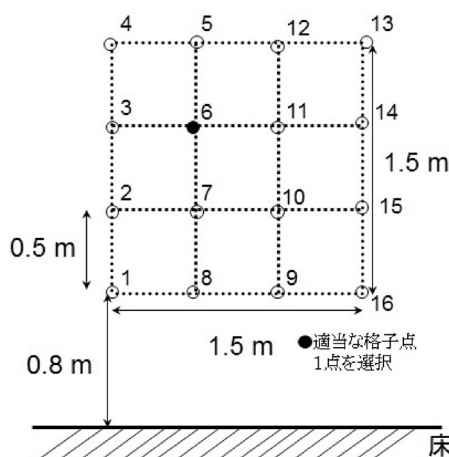


図4 試験に用いる照射電界均一性の評価対象領域における測定点の配置

4.2 電界均一性の測定結果 (空間分布)

4.2.1 水平偏波の空間電界分布

アンテナを水平に設置して、4.1 節の手順に従って測定と調整を実施した。その空間電界強度分布を図 5 ~ 図

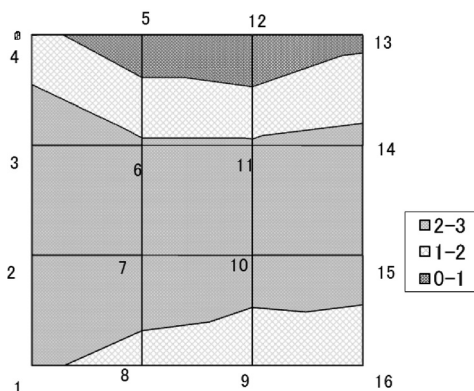


図5 試験領域の空間電界強度分布
送信周波数 26 MHz (水平偏波) (dB)

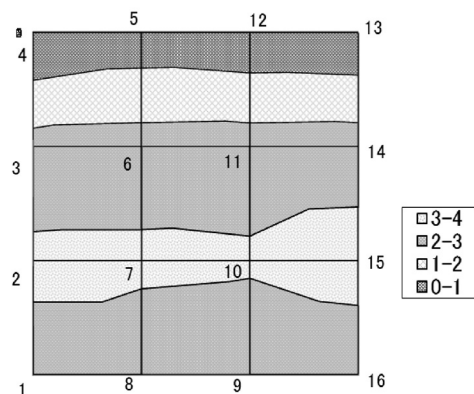


図6 試験領域の空間電界強度分布
送信周波数 80 MHz (水平偏波) (dB)

9に示す。最小値を0 dBとした相対的な電界強度分布である。電界強度分布を評価した周波数帯では概ね0～6 dBの許容値内にあり、これを大きく超える変動は見られなかった。

図5～図9の格子点ごとの電界強度分布パターンは、進行波電力を変化させても基本的には変化しなかった。

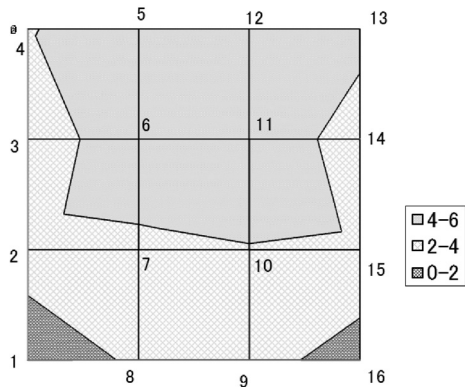


図7 試験領域の空間電界強度分布
送信周波数 500 MHz (水平偏波) (dB)

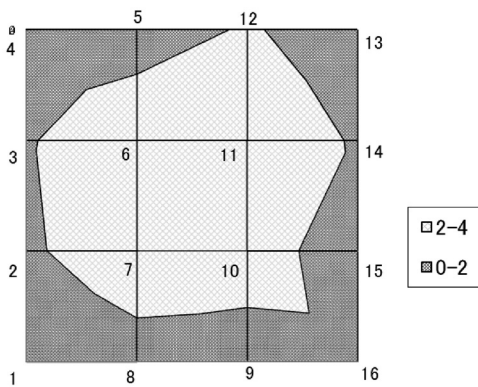


図8 試験領域の空間電界強度分布
送信周波数 1000 MHz (水平偏波) (dB)

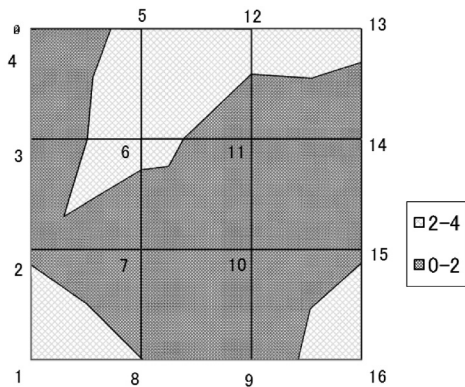


図9 試験領域の空間電界強度分布
送信周波数 2000 MHz (水平偏波) (dB)

4.2.2 垂直偏波

4.1節に従って測定を実施した。その結果を図10～図15に示す。

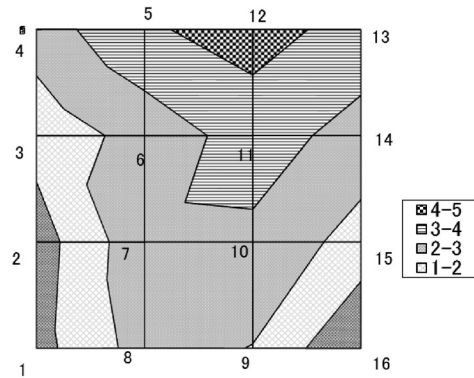


図10 試験領域の空間電界強度分布
送信周波数 26 MHz (垂直偏波) (dB)

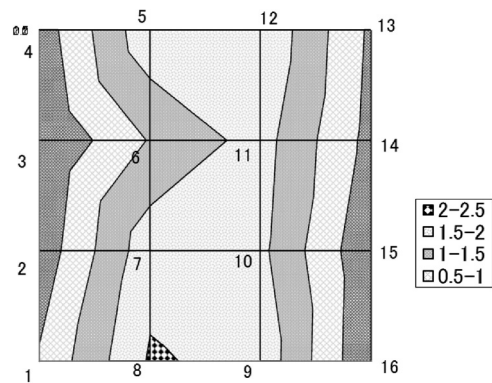


図11 試験領域の空間電界強度分布
送信周波数 80 MHz (垂直偏波) (dB)

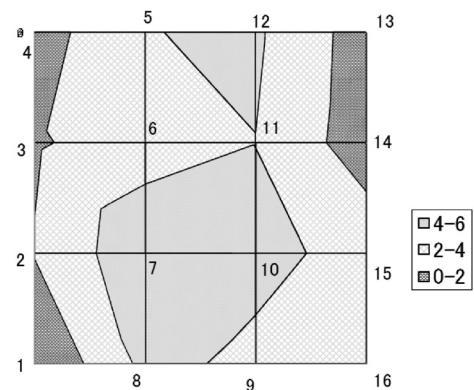


図12 試験領域の空間電界強度分布
送信周波数 500 MHz (垂直偏波) (dB)

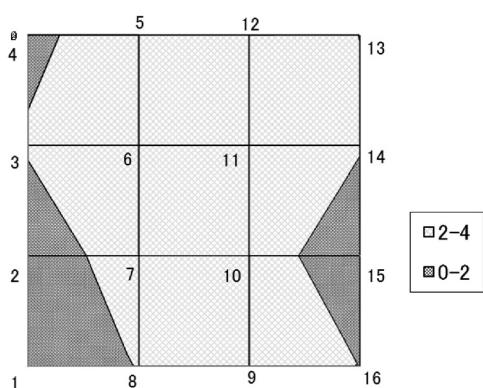


図 13 試験領域の空間電界強度分布
送信周波数 1000 MHz (垂直偏波) (dB)

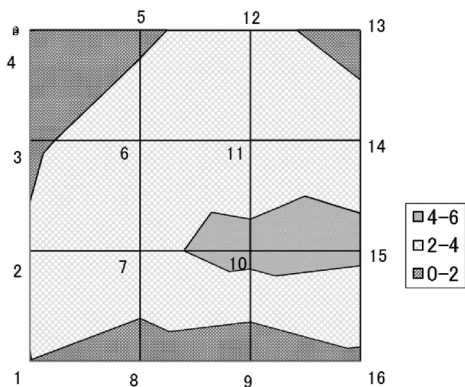


図 14 試験領域の空間電界強度分布
送信周波数 2000 MHz (垂直偏波) (dB)

垂直偏波による空間電界強度分布を図 10～図 14 に示す。水平偏波の場合と同様の電界強度分布パターンを示し、概ね 0～6 dB の許容値内にあった。従って、改修した電波暗室は 2 GHz まで拡張した試験の周波数帯で、周辺反射体のさらなる改善を要することなくこの条件の均一性を満たし、試験を実施できる見通しを得た。

4.3 試験用電界強度分布の周波数依存性と評価

前節で示したように空間分布の位置の依存性に極端な乱れはないので、試験前に調整すべきパラメータは試験周波数における進行波電力であると考えた。周波数を 1% の増分で更新しながら前節のような空間分布測定を行い、その情報からすべての周波数のデータを分析した。

イミュニティ試験において重要なのは電界の絶対値と許容される変動幅であり、その変動幅には、16 個の格子点のうち 75% (12 個) に該当する格子点の選択により、また電界の絶対値には電力の調整により対応することになる。16 個の格子点の電界の最大値、最小値、変動幅を

示し、次に、0～6 dB の許容値内にある 12 個の格子点の最大値、最小値、変動幅を精査し、最後に、進行波電力の調整により電界を調整した。具体的には 4.1 節の方法の手順に従い、手順の各段階の電界分布の状態について周波数を横軸にして図 15～図 18 に示す。

4.1 節の測定・調節手順の 1 と 2 の結果として、16 個の格子点の電界強度のばらつきの周波数依存性を図 15 に示す。各測定周波数における 16 個の格子点の最大値と最小値を、またその変動幅を同様に dB 表示により示す。dB で表す縦軸は、電界強度については周波数に関わらず共通の格子点 (図 4 で示す適当な格子点 1 点) を決めて、その格子点の電界が設定電界になるように調整して設定した電界を基準として dB 表示している。縦軸の最大値と最小値に関しては、イミュニティ試験の設定電界強度 (図 15 の測定例では 5 V/m) が 0 dB である。また、変動幅については相対目盛りであり、同様に縦軸の dB 表示で読み取る。電界強度の変動幅は周波数に依存し、16 個の格子点のすべてでは 6 dB 以上の変動を示すいくつかの周波数があるが、8 dB 以下の変動となっている。

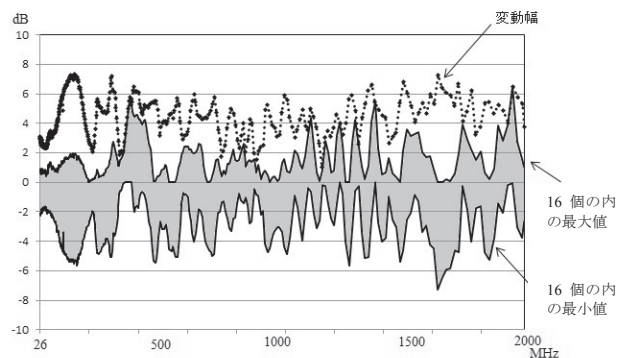


図 15 全格子点の電界の最大値、および最小値と変動幅 (0 dB は全周波数共通に選択した格子点に設定した試験電界値である)

次に、4.1 節の方法の手順 3 により均一性の 0～6 dB の許容値条件に合致する 12 格子点を選択した結果として、前図と同様に最大値、最小値とその幅を図 16 に示す。手順 3 の中では 6 dB 幅に収まるための 12 個の格子点の選択についての繰り返し作業があるが、実際にこれを行った周波数は、300 MHz 付近 (312 MHz～319 MHz) の範囲のみであり、その試行回数は 2 回である。これから分かるように、ほとんどの周波数帯域において 0～6 dB の許容値内のための 12 個の格子点として選択されなかった格子点は電界強度が高く、図 15 と比べて図 16 では最小値は変化せず、最大値が下降して変動幅が縮小して

いることが分かる。また、4.1節の手順4は電界の変動幅が大きくは無く、手順3により完了したため省略された。これにより0～6 dBの許容内という条件への整合性が確認されたことになる。

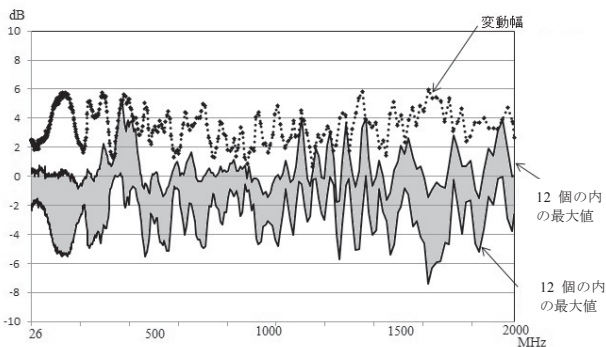


図16 選択した12個の格子点の電界強度の最大値、最小値とその変動幅を示す。

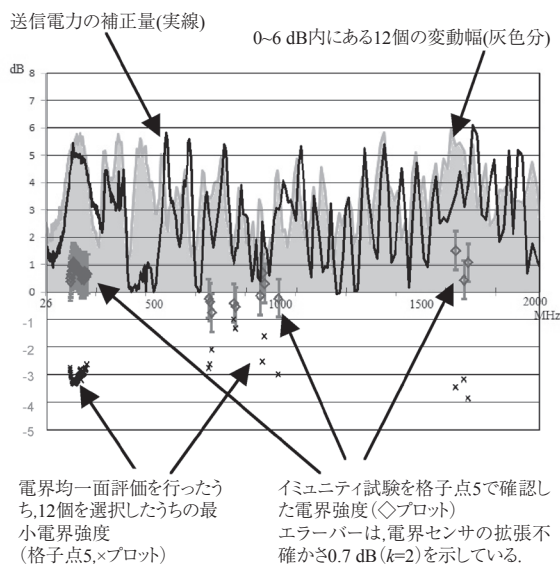


図17 試験レベルの規定値5 V/mでイミュニティ試験を実施する場合の進行波電力の増加分(黒線)を示す。

次に必要なことは、電界のレベル合わせである。4.1節の手順5で、進行波電力の調整により図16に示す変動幅の最小値を0 dBに合わせるようになるが、図16からわかるようにほとんどの周波数で0 dBを下回っているため、進行波電力を増加して持ち上げることになる。IEC 61000-4-3:2006⁴⁾ではその付録Dに記述されているように最終段の増幅器の飽和などに注意が必要であり、これに対して本試験システムでは、通過型電力計等による進行波・反射波電力をモニターし、信号の歪みはスペ

クトルアナライザにより高調波を事前に確認している。このIEC 61000-4-3:2006では測定電界の不確かさについても記述されており、電界強度計の校正の不確かさの範囲以内であることが許容されている。図16から本試験システムに必要な周波数ごとの進行波電力の増加分を調整した結果として予想される電界強度の周波数分布を図17に示す。更に、その電界の実測結果として0～6 dBのばらつきのうち、図4の格子点5に電界強度計においてその点がばらつきの最小値となる周波数を選択して、試験レベルの規定値(グラフでは0 dB)に持ち上げた結果の実測の電界強度を図17に示す。エラーバーの付いていない点が調整前の電界を、エラーバー付きが調整後である。本試験システムでは200 MHzと1000 MHzを境に3台の電力増幅器により周波数範囲が分割されており、それぞれの電力増幅器の周波数範囲ごとに電界強度の調整を実測により確認した。中央の周波数帯域の電力増幅器の電力調整後の測定値が若干低いが、IEC 61000-4-3:2006での不確かさの記述により電界強度計の校正の不確かさの範囲であるため規定に整合しており、本試験システムの0～6 dBの電界強度分布の均一性が確認された。

前述の12個の格子点の選択方法では、電界強度分布の均一性条件である0～6 dBの許容値内に入っている12個の格子点の電界を示す図16での最大値は、すべての格子点の電界を示す図15の最大値より当然低く、選択されなかった格子点の電界は0～6 dBの許容値より大きくなる。これは、IEC 61000-4-3:2002 (JIS C 61000-4-3:2005)に推奨された方法では手順3のように12個の格子点の選択方法が最小値から始めて選んでいるため、電界強度の均一面の評価において選択されなかった格子点が一般的に、より電界強度の高いためである。しかし、実際にイミュニティ試験を実施する場合には、選択した12個の格子点に限った環境で試験をするわけではなく、当然そこに存在する電界すべてが被試験器物に照射されることになり、特に低レベルの電界を試験レベルの規定値にまで持ち上げるために、高電界部分は益々持ち上げることになる。そこで、過大な電界強度をできるだけ照射しないイミュニティ試験が可能かどうか、IEC 61000-4-3:2002 (JIS C 61000-4-3:2005)に推奨される調整方法とは別の調整方法を試みた。

この調整方法は、4.1節の手順3で最小値から昇順に並べている電界測定値を逆に大きい方から降順に並べて大きい方から12個の格子点の選択を行い、これに合わせて進行波電力の調整を行う方法である。その結果を同様に最大最小値と変動幅により図18に示す。

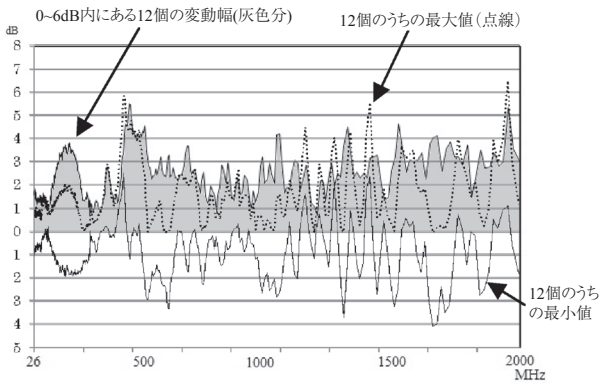


図 18 大きい方から降順に並べた 16 個の格子点の電界強度のうち、0～6 dB の許容値条件のために大きい方から 12 個の格子点を選択し、その最大値、最小値を示す。また、進行波電力の調整により最小値を 0 dB に揃えた格子点電界の変動幅を示す。

この方法においても破線で示される最大値と最小値が表すように、拾い出した 12 点の変動幅を 6 dB に収め、さらに進行波電力の調整後には規定の 0～+6 dB の範囲（灰色部分）に収めることが可能である。試験電界の空間分布の均一性を担保するためのこれら 2 種類の選択方法の明確な違いは進行波電力の調整分であり、図 17 では均一性を示す 12 格子点の電界強度の更の上に選択されなかった格子点の電界があるのに対して、図 18 の選択方法では選択した 12 格子点以外の格子点の電界は最小値（規定値）より下に位置する可能性が高いことになる。このため実際の試験の際に照射される電界も規定値+6 dB を超えることはほとんど無く、過大な電界強度を照射しないで 0～6 dB の許容値条件に準拠するイミュニティ試験が実施可能となる。

4.4 作業効率の改善効果

計量法では型式承認試験の標準処理期間が定められており、NMIJ はその期間中に処理することが求められるため、作業効率の改善は重要な事項である。3 章で述べた改修では、1 GHz までの周波数領域の試験でもアンテナを 200 MHz で取り替えていた状況に比べて、周波数範囲を 26 MHz～2 GHz まで拡大したにもかかわらずより広帯域を使用範囲とするバイログアンテナを導入したことにより効率的な試験が出来るようになった。参考に、次の条件下での試験を実施した際の試験完了までの時間を比較した。

- ・ 26 MHz～1000 MHz の範囲で 368 点の周波数（増分が 1 % の等比級数系列）、
- ・ 3 V/m,

- ・ 被試験器物の 4 面に対して照射
- ・ アンテナ方向を水平及び垂直

改修前は約 3 日（セッティング等の準備時間を含む）を要したが改修後には 1.5 日とほぼ半分の時間に短縮され、試験時間の大幅な効率化を図ることができた。

さらに、電界センサを電池駆動から商用電源方式のものに変更した効果は、電池の消耗による試験中断の危険を回避すると共に、電源の安定性を確保して継続した試験を可能としたことである。

作業性の改善のために暗室内をより明るくすることを目的に、白色発泡スチロールを電波吸収体の表面に付加することは、それによる電波の反射散乱により電界強度分布の均一性に悪影響を及ぼす懸念があったが、実際には当科の電波暗室にとってはほとんど影響しないことが確認できた。その主な根拠としては、使用周波数帯で影響がない程度に発砲スチロールの材質の密度を選択したため、ほとんど自由空間と等価であったことが挙げられるが、今後、より高い周波数に規制範囲が拡大される場合には電波暗室の壁面反射の原因となりうることも留意する必要がある。

暗室内の天井 4 カ所にライトを追加することも電流的な性能には全く影響がなかった。ライトの設置位置が電波暗室の天井の隅 4 カ所に設置したため、これらに近い位置にある試験面の端から 1 m 程度は離れており、距離の効果によりライトの反射波の影響をほとんど受けなかったと推測される。

5. まとめと今後の課題

IEC 61000-4-3:2002（JIS C 61000-4-3：2005）のイミュニティ試験における拡張された対応周波数範囲に対して、試験設備を改修して対応周波数範囲を拡大した。加えて電波暗室の他の機能も改善を行った。

IEC 61000-4-3:2002（JIS C 61000-4-3：2005）に推奨される調整方法である最小値を 0 dB とした相対的な強度分布において、照射アンテナの水平及び垂直偏波のいずれの場合においても、電界強度分布の均一性として 16 個の格子点のうち試験面の 75 % 以上が 0～6 dB の許容値内に入っていること（測定された 16 点の内少なくとも 12 点が許容差内であること）が確認でき、周波数範囲を拡張した 1 GHz 以上を含み、当該規格に満足していることを検証した。加えて、0～6 dB の許容値条件に準拠しながら不必要に大きな妨害電磁波を加える試験を回避する方法も試行してその実施可能性を確認した。この試験方法を型式承認の適合性評価に取り入れるかどうか

については、製造事業者や試験機関などの関係団体と妥当性について検討していくことが次のステップとなり、今後の検討課題と思われる。

当科の電波暗室は小型の被試験器物（0.5 m×0.5 m×1 mほど）を対象とするイミュニティ試験に用いるので、手作業により被試験器物の搬出入ができることが条件として使用されることが多い。今回の改修ではアンテナをより大型のパイログアンテナに変更したため、アンテナと電波暗室内壁との距離を十分取ることが難しくなり、特にアンテナの水平偏波使用状態において、電界均一性の国際規格への整合が容易ではなくなった。これを解決するために、電界強度分布を精査し、測定を重ねて均一性条件に合致した。

自動車給油メーター等においては、2009年6月1日よりJIS規格を検則に引用されることとなった。それにより、「計量システム」として評価をすることになり、本試験設備が対象とする被試験器物の大きさが、1 m×1 m×1 mを超えるほど拡大することが予想される。また、POS（販売時点情報管理システム）なども試験対象として追加されることが計画されており、より大型の被試験器物でも効率良く試験が行える環境が今後必要になる。

本論で述べた対応周波数範囲の拡大と試験効率改善のための改修の結果を踏まえ、今後はアンテナと被試験器物の距離、被試験器物と電波暗室壁面間の距離、アンテナと暗室壁面間の距離を十分確保できる電波暗室を検討すると共に、大型被試験器物に対しても対応できる電波暗室への改修、もしくは建設が必要になる。更に、NMIJが型式承認の試験を実施している機関であること、また、OIML適合証明書発行機関であることから、国内外での型式承認業務や適合性評価を実施している機関等の電波暗室における電界強度分布の測定を実施し、その同等性についての評価など適合性評価の信頼性の確保につながるための検討をはじめの必要がある。その理由として、電波暗室はそれぞれの電波暗室毎に壁面反射の状態が異なることから内部の電界強度分布等の特性も異なるため、最終的に適合性評価の結果にばらつきの影響を与えることにつながる可能性が高いからである。更に、試験設備の能力に加えて、試験方法や運用方法に関する具体的な基準（標準化）が求められる。具体的には実際にイミュニティ試験を行う場合の被試験器物のケーブルの配置など試験結果に影響を与えることが挙げられ、この点をなおざりにすると試験結果の再現性の低下につながり、適合性評価の結果にばらつきが出ることにもなる。それを解決するためには、細部まで規定する統一的な試験方法の確立も必要となる。これにより適合性評価の結

果にばらつきの影響を減らし、信頼性の確保につながることから、今後の取り組みが必要であると考えられる。さらに、最終的には、イミュニティ試験全体としての不確かさを考慮して適合性評価が必要となる。現在の計量法の型式承認試験並びにOIML適合証明書発行におけるイミュニティ試験では、OIMLが発行しているOIML D30 Guide for the application of ISO/IEC 17025 to the assessment of Testing Laboratories involved in legal metrology (OIML D 30 Edition 2008 (E))に従い、運用しており、その内容は、イミュニティ試験設備の個々の装置の国家標準トレーサビリティの確保は実施しているが、イミュニティ試験全体の不確かさについては、OIML D30には取決めされていない。従って実際のイミュニティ試験では、被試験器物の表示値の変化量が技術基準を満たしているかどうか等の評価のみで、測定の不確かさを含めた試験環境全体の不確かさを考慮していないのが現状である。なお、試験全体の不確かさ評価の必要性については、OIMLではまだ議論の途上であり、強制力はないが、JCGM (Joint Committee for Guides in Metrology)は測定の不確かさに関するガイド (Guide to the expression of Uncertainty in Measurement, 1993 (corrected, 1995))を発行しており、OIMLではGuide 1として発行されている。以上を踏まえ、国際的な動向を見据えつつ、試験全体の不確かさ評価を取り入れることが今後のNMIJの課題である。

謝辞

本稿をまとめるに当たり、親切なる多大なご指導並びにご助言を賜りました電磁波計測科 小見山耕司科長をはじめ、電磁波計測科 高周波標準研究室 島田洋蔵室長、電磁界標準研究室の皆様へ深く感謝いたします。また、平成23年度より就任されております法定計量技術科 山口詩希鬼科長には貴重なご助言を頂戴しました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 新計量法の概要, 通商産業省機械情報産業局計量行政室編
- 2) IEC 61000-4-3 Second edition 2002-3, Testing and measurement techniques - Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test
- 3) JIS C 61000-4-3:2005 (IEC 61000-4-3 : 2002), 放射無線周波電磁界イミュニティ試験

- 4) IEC 61000-4-3 Third edition 2006-2, Testing and measurement techniques - Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test
- 5) MIL-STD-285: Military Standard Attenuation Measurements for Enclosures, Electromagnetic Shielding, for Electronic Test Purposes, Method of. 1956