

電磁界・アンテナ計測標準に関する研究

(Development of the Techniques for Precision Measurement of Electromagnetic Fields and Antennas)

光技術部

小見山耕司, 森岡健浩, 廣瀬雅信

Measuring standards of electromagnetic field and antennas are important for the trade and industry in the meaning of the EMC regulation. The major frequency range of EMC regulation is from 30 MHz to 1000 MHz. In this region an open-area test site (OATS) and dipole antennas are usually used as the standard equipment. Electrotechnical Laboratory built an OATS for the evaluation of standard dipole antennas in 1999. At the same time, we began the research of standards development. They are the evaluation of OATS and the measurement of dipole antennas. Several antenna sites and commercially available dipole antennas were used. They are measured and compared to each other. The results contribute to the evaluation of the uncertainty of antenna standards. The future plan is also explained respecting the preparation of standards in electromagnetic field and antennas.

1. はじめに

電磁環境両立性(EMC)は、評価対象である電子機器からの電磁ノイズを計測し、その強度が許容値以下に抑えられていることにより保証される。現在では明確な規制として貿易その他の商取引上重要な意味をもつようになったため、規制のための測定器類が共通の感度をもつことが重要となった。特に、自由貿易のための国際相互認証制度が調印されて計量標準の重要性が認識され、EMC規制が非関税障壁とならないよう規制に用いるアンテナ感度や空間電磁界の共通化を図るため計量標準の重要性が増した。

EMCのための電磁界標準には、高精度の電磁界またはアンテナに関する計測評価技術を確立することが不可欠であり、国際比較などを通して諸外国と共通するEMC評価基準を有することが重要である。電子技術総合研究所では、以前からアンテナの標準研究が行われたが¹⁻³⁾、実際の校正業務につながるまでには至らなかった。最近になって計量標準の重要性が再認識され、電磁界・アンテナ標準の研究が開始された。最初、EMCの中心となる30MHz～1000MHz周波数帯の標準研究開発を目的として、空間分布する電磁界を高精度測定技術の開発が開始された。この目的のもとに

30MHz～1000MHzの周波数帯で電磁界強度測定に用いられる半波長ダイポールアンテナの特性評価と、同周波数帯で測定場として用いる大規模な標準オープンサイト(OATS: Open-Area Test Site)の建設と高精度評価技術の開発を並行して行ってきた。

電子技術総合研究所では平成10年度末にアンテナ測定用標準オープンサイトを建設した。このアンテナサイトは、英国の国立研究所の仕様に準じたミリ単位の平坦度を有するグラウンドプレーン面を有し、この設備を用いることにより高精度の測定が期待できたが、当研究所では国家標準精度をめざしたオープンサイト標準測定のための基盤技術が十分整備されていなかった。このため、アンテナサイト評価技術と標準アンテナ測定技術を早急に確立する必要があり、標準サイトの完成に先立って平成10年度後期にNEDO共同研究「電磁環境両立性保証のための標準測定オープンサイト評価の基盤技術開発」により、EMC規格の商用オープンサイトを利用してアンテナ測定・評価技術を蓄積するとともに、国内外の商用EMCオープンサイトとアンテナ測定サイトを使用し標準ダイポールアンテナの比較測定を行って、電総研オープンサイトの評価及びアンテナ測定の精度の評価を行い、計量標準として不可欠な不確かさ推定の基礎を構築した。

研究の内容として、アンテナ測定の基本理論方法と実験的研究の内容を示す。

2. 研究内容

空間に分布する電磁界の精密測定のためには、空間電磁界と回路のインターフェイスとなるアンテナの特性評価が不可欠である。アンテナの特性には入力インピーダンスや指向性、利得などがあげられるが、いずれの特性を測定する際にも外部到来波や周囲構造物からの散乱波によって測定精度が低下する。そのためアンテナ測定はこれらの不要電磁波の存在しない自由空間で行うことが理想である。自由空間を実現する測定施設としては電波暗室があるが、現在のところEMC計測に最も必要とされる30～1000MHzの低周波領域においては、波長が長いのでアンテナ自体も大きくなり、それに伴って大型の電波吸収体と大型の電波暗室が要求され、経済的な問題が生じる。波長に比べて小型の電波暗室を使用すると周囲壁からの反射が無視できなくなる。また、屋外での測定では、地面以外には周囲に反射物のない広大な空間を確保しても大地面があるために送受アンテナ間の伝播以外の伝播経路を無くして自由空間を実現することは困難である。そこで、屋外におけるアンテナ間伝播で測定精度に最も大きな影響を与える大地面の反射特性を理想の反射として取り扱うことによって理論的な解析が行えるように、金属のメッシュや金属板を大地に敷いた屋外測定施設がオープンサイトである。大きな金属板を大地面に敷いたとしても金属面は有限の大きさであり、周囲の散乱体も完全に取り去ることが出来ないため、測定サイトが完全に理想的になることはない。そのために、OATSではグランドプレーンを可能な限り大きく作り、さらにグランドプレーン周囲に金属のメッシュを取り付け電氣的に大地と整合させる工夫がなされている。周囲環境を含むオープンサイト特性、アンテナ特性と測定回路特性を全て含む総合的な測定値としてサイトインサクションロス(SIL)が測定される。この値から、計算によって求められた理想的なOATS特性を取り除くことによってアンテナ特性を求めることが出来る。しかし、この様にして求められたアンテナ特性はOATSが理想状態であることが前提となる。このことからOATSは可能な限り大きく、か

つ平坦なグランドプレーンを持つことが必要となる。

OATS アンテナサイトの評価として、測定精度に多大な影響があるグランドプレーンの構造と大きさが異なる5箇所のサイト(商用サイトA～C, NPLサイト, ETLサイト)を対象に比較測定を行った。構造と大きさは以下のとおりである。サイトAは金属性メッシュを金属プレートで挟んでつなぎ合わせたものであり、表面処理は行われていない。グランドプレーン面は大地から1m程度土盛りされた上に作られており、その大きさは伝播方向が25m, 横方向が15mである。サイトBは大地と同一の平面内に作られた溶接による一枚鉄板で作られたグランドプレーンを持つ。このサイトは山間部に有り、電磁波の伝播方向と直行する方向に崖が存在する。サイトCはCISPR楕円と同等の大きさがあり、今回測定を行ったサイトの中で最も大きい。グランドプレーンはメッシュ製であり、表面はコンクリートで覆われている。このサイトも山間部にあるが、周囲は広い範囲で多少の段差がある程度である。NPLのOATSは溶接された1枚鉄板で出来ており、30m×60mの大きさを持つ。また周囲は広大な芝地になっており、電磁波を散乱するような構造物はない。最後に、NEDOとの共同研究中に完成したETLサイトでの測定を実施し、比較を行った。

標準アンテナとして評価されるアンテナの特性は空間電界に対する感度である。空間電界と測定器により計測できる回路量(電圧)との関係を定義したものにアンテナ係数がある。これは、空間に存在する電界と、その電界中にアンテナを置いたときに測定器で計測されるアンテナ端子電圧との比で定義され、以下のよう表される。

$$AF = \frac{E_z(V/m)}{V(V)} \quad (1)$$

ここで、 E_z と V はそれぞれ空間に存在する z 軸方向の電界強度と測定器の指示電圧である。アンテナがない場合の空間電界 \bar{E} は測定のためにアンテナを空間に配置することによって乱され、アンテナ及びそれに付随する給電ケーブル等による散乱項 $\Delta\bar{E}'$ が加算された \bar{E}' となる(図1)。

自由空間に存在する波源からの電磁界は、アンテナまで散乱されることなく到達するために直接波のみが受信される。しかし、OATSにおける測定にはグラン

ドブレーションが存在するために、波源からの直接波とグランドプレーンによる反射波の合成界が受信される。この様子を図2に示す。受信アンテナが存在しない場合に観測点における電界は $\vec{E} = \vec{E}_{dir} + \vec{E}_{ref}^{TR}$ のように、送信アンテナからの直接波と反射波の合成電界で表される。受信アンテナが存在する場合は

$$\vec{E}' = \vec{E}_{dir} + \Delta\vec{E}_{dir} + \vec{E}_{ref}^{TR} + \Delta\vec{E}_{ref}^{TR} + \vec{E}_{ref}^{RR} \quad (2)$$

の電界が受信アンテナ上での境界条件を満足することになる。ここで $\Delta\vec{E}_{dir}$, $\Delta\vec{E}_{ref}^{TR}$ はそれぞれ、受信アンテナと送信アンテナ間の結合による直接波と反射波の変化電界である。よって、送受信アンテナが存在する場合の境界条件は以下のように表される^{4,5)}。

$$\vec{E}' \times \vec{n} = 0 \quad (3)$$

この境界条件を満たす電流 I をモーメント法⁶⁾などの数値解析手法を用いて求め、測定器電圧 V を測定系の特性インピーダンス Z_0 と端子電流との関係 $V = -Z_0 I$ を用いて式(1)に代入することによってアンテナ係数を求めることができる。

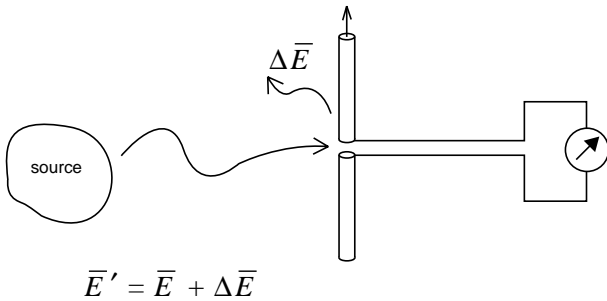


図1 空間の電界とアンテナによる散乱電界

アンテナ係数を実験的に導出する手法として広く用いられているのが3アンテナ法である。この手法はアンテナ係数の未知なアンテナ3本を用いて、2本ずつ3通りの組合せでSILを測定することにより3つの連立方程式を得る手法である。この方法によって、3つのアンテナ係数を以下のように求めることができる。

$$AF_1 = 10 \log f_M - 24.46 + [E_H^{\max} + A_1 + A_2 - A_3] / 2 \quad (4)$$

$$AF_2 = 10 \log f_M - 24.46 + [E_H^{\max} + A_1 + A_3 - A_2] / 2 \quad (5)$$

$$AF_3 = 10 \log f_M - 24.46 + [E_H^{\max} + A_2 + A_3 - A_1] / 2 \quad (6)$$

ここで、 E_{DH}^{\max} は受信アンテナを高さ $h_2^{\min} \leq h_2 \leq h_2^{\max}$ の範囲で掃引した時の $ABS(E_{DH})$ の最大値である^{7,8)}。 $AF_{1,2,3}$ は3つのアンテナの各アンテナ係数、 $A_{1,2,3}$ は3つのアンテナの異なる組合せにおけるサイト挿入損であり、 f_M はMHz単位の測定周波数である。

空間電磁界の測定には、計算によって特性が予想できる半波長ダイポールアンテナを用いた。SILを測定し、かつ3アンテナ法によりアンテナ係数の値付けと再現性評価を行い、標準アンテナと標準サイトに必要な性能を評価した。30MHz～1000MHz周波数帯域ではアンテナ標準として24点の特定な周波数において測定を行うが、プロジェクトの時間的制約により、代表的な60MHz, 180MHz, 400MHz, 700MHzの4周波数においてのみ測定を行った。

測定評価に使用したアンテナは固定長共振ダイポールアンテナ(アンテナA, B), 可変長ダイポールアンテナ(アンテナC)の2種類である。測定の際、アンテナ係数に高さ依存性があるために、送受信アンテナで高さが異なるANSI C63.5⁹⁾に記載されている3アンテナ

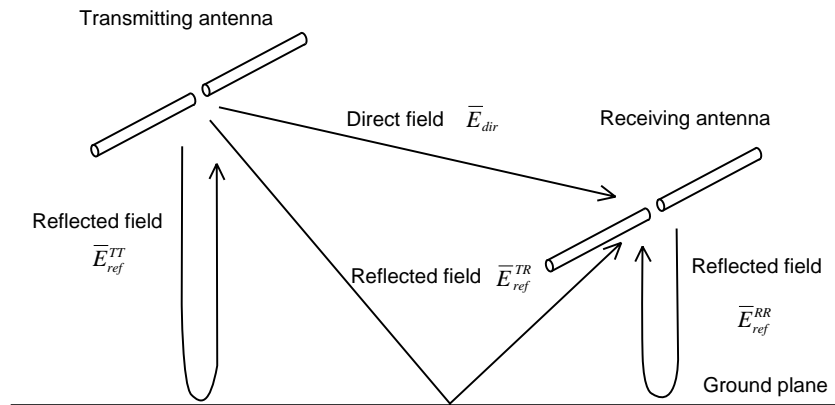


図2 グランドプレーン上での電界

ナ法による測定では、高い精度でのアンテナ係数導出は難しいことが判明した。測定を行った商用サイトを含む各サイト、周波数毎のアンテナ係数導出測定の再現性はANSI C63.5の手法を用いても最大±0.8dBの範囲であった。そこで、送受信アンテナ高が同じになるように測定を工夫し、同様に3アンテナ法を用いて測定を行った。この測定で求めた5箇所のサイトでのアンテナAのアンテナ係数を図3に示す。この結果より、送受信アンテナ高をそろえた測定の方がアンテナ係数の分散が最大で±0.3dB程度になることがわかった。また、上記組合せによる測定結果より導き出した各アンテナのアンテナ係数は、固定長共振ダイポールアンテナの方が可変長ダイポールアンテナと比較してばらつきが少なく、再現性が良いことがわかった。

これは、アンテナエレメントの長さを周波数に合わせて毎回調整するために、エレメント長に誤差が含まれやすいことによると考えられる。測定場としてのオープンサイトには、サイト毎に周囲環境を含めた傾向があることが確認できた。さらに、測定精度の比較はできないが、金属板のグランドプレーンの方が金属メッシュのグランドプレーンよりサイト間での相関は取れていることがわかった。

標準アンテナとしての値付けはアンテナ係数を使用するが、OATSの特性の比較測定はSILで行った。NEDOとの共同研究で行ってきた4周波数での測定に加え、30MHz～1000MHzの24周波数におけるSIL測定をETLサイトで行った。この測定結果はNPLで測定されたSILと比較した。図4に各周波数における測定され

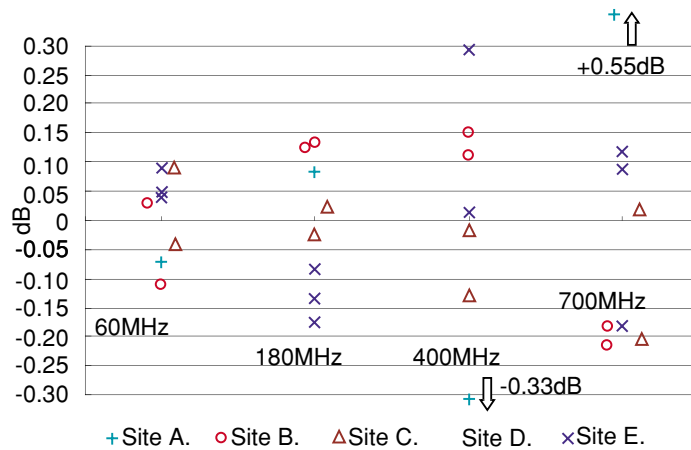


図3 アンテナ係数 (アンテナA)

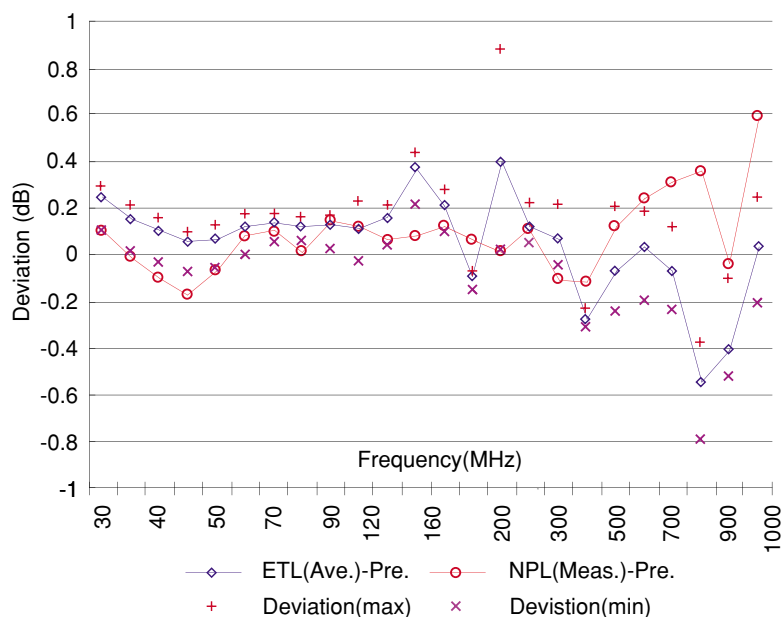


図4 ETLとNPLサイトにおけるSIL測定値の計算値からの偏差

たSILの予測値からの差を示す。計算による予測値とETLサイトでの測定値平均の差は、測定周波数が高くなるに従い大きくなる傾向があり、1000MHzにおいて0.6dB程度になるが、その他は±0.4dB以内に収まっていることがわかる。また、ETLサイトでの測定値とNPLによる測定値の差は800MHzで0.8dB程度あるが、その他の周波数では±0.4dB以下であることがわかる。このことはETLサイトとNPLの英国標準サイトとが同程度の特性を有することを示している。

3. 研究の成果

本研究では5箇所の異なるオープンサイトにおいてアンテナ間減衰(SIL)を測定し、3アンテナ法に基づいてアンテナ係数を導出した。これらのサイトにおける測定結果より、以下の結論を得た。

1. アンテナ係数に高さ依存性があるために、送受信アンテナで高さが異なるANSI C63.5に記載されている3アンテナ法による測定では、高い精度でのアンテナ係数導出は難しい。
2. 3アンテナ共に送受信アンテナとなる組み合わせを用いての3アンテナ法と一般に行われる簡易的な3アンテナ法での測定での差は認められなかった。
3. 各サイト、周波数毎のアンテナ係数導出測定の再現性を確認できた。
4. サイト毎に周囲環境を含めた特性があることが確認できた。また、メッシュ製のグラウンドプレーンを持つサイトに比べ、溶接鉄板のグラウンドプレーンを持つサイトの方がサイト間の特性に差が少ないことがわかった。
5. 24周波数におけるNPLの測定値とETLサイトでの測定値によって、両サイトの電気的特性はほぼ同程度であることが確認できた。また両サイトでのサイト挿入損測定値と計算による予測値との差は±0.6dB程度であることがわかった。

これらの成果は、30MHz～1000MHzの周波数帯での標準ダイポールアンテナの値付けと不確かさの評価、及び、その測定に不可欠なアンテナサイトの評価に資することになる。

4. 今後の研究展開の方向

当ラボでは電磁界・アンテナ標準として以下のような分類を挙げている。

- (1) 電磁界強度(ホーン,電波暗室,PFDプローブ)
1～40GHz
- (2) 電磁界強度(ホーン,電波暗室) 40～110GHz
- (3) アンテナ係数(TEMセル,微小アンテナ(モノポール,ダイポール,ループ)) 10kHz～150MHz
- (4) アンテナ係数(ダイポールアンテナ,標準オープンサイト) 30MHz～2GHz
- (5) アンテナ係数(ログペリアンテナ,バイコニカルアンテナ等) 30MHz～1GHz
- (6) 利得・偏波分離度(ホーンアンテナ,電波暗室,ニアフィールド走査システム) 1～40GHz
- (7) 利得・偏波分離度(ホーンアンテナ,電波暗室,ニアフィールド走査システム) 40～110GHz

本稿に記した研究は項目(4)のアンテナ係数の標準の一部である。今後、アンテナサイト(OATS)におけるアンテナ校正精度を向上させるためには、アンテナ形状やグラウンドプレーン特性などを含んだアンテナ間伝播減衰をモデル化し、数値解析手法を用いて高精度で計算し、求めることが重要である。測定に関してはアンテナ間距離を変えることなどによって測定信号のヌルを避ける、固定高3アンテナ法などの測定法による測定や、ダイポールアンテナのみでなく、項目(5)に挙げたような広帯域のバイコニカルアンテナ、ログペリオディックアンテナ等を対象に、アンテナ間伝播減衰を測定し実験的にアンテナ係数を求める標準測定法の開発も必要になる。同時に、これらの複雑な形状を持つアンテナに対しても数値解析による評価を可能にすることも重要である。

項目(1)(2)は1GHz以上の電磁界強度標準、(6)(7)は同アンテナ標準である。項目(3)は、より低い周波数領域のアンテナ標準である。これらの周波数帯の異なる標準を開発するため、高い周波数ではホーンアンテナ標準研究を開始する。より低い周波数帯では、共振アンテナの使用が困難であるため、微小アンテナを用いた標準を開発する。車両レーダ等の今後利用が見込まれるミリ波領域の標準のためには新規にミリ波測

定用電波暗室,長波長領域測定には大型TEMセルなど,電波測定には大型設備が不可欠であるため,これらの設備の整備と人材の確保を進める必要がある。

5. おわりに

当ラボではRF周波数帯からミリ波帯までの電磁界・アンテナの計測評価技術の構築と1次標準の確立・維持,標準供給とトレーサビリティの整備,ならびに,それらを実現するための設備・環境整備を目標とし,EMCや遠隔計測などへの応用として精密計測技術の利用を図る。

本稿に記した研究開発により得られるダイポールアンテナ標準をもとにしたアンテナ校正を行う上で,トレーサビリティの確保に必要な要件の検討が必要になる。アンテナ測定法としては電総研オープンサイトで採用した3アンテナ測定法を踏襲するが,校正先のアンテナサイトのグランドプレーン評価研究も含まれる。

さらに,国際比較も重要である。EMC標準分野で大規模な組織を有して活動を行っているのは,NIST,NPLである。平成12年4月にはNISTとの二国間国際比較の交渉を開始し,平成11年3月にはNEDOプロジェクトによりNPLにおいて英国標準アンテナサイトでの標準アンテナ測定を実施,その後NPL研究者との相互訪問などにより交渉を進めている。

また,周波数帯を拡張してホーンアンテナ標準研究を開始するが,この周波数領域でも同様の研究開発と手続きにより計量標準が開発される。

参考文献

- 1) I. Yokoshima : Absolute measurements for small loop antennas for RF magnetic Field standards, IEEE Trans. IM-23, No. 3, Sep. 1974.
- 2) 山浦,横島 : 挿入損失法を用いたホーンアンテナの利得の精密測定, Vol.57B, No.9, 1974.
- 3) 松井 : VHF-UHF帯各種アンテナの校正, 電子技術総合研究所彙報, 第1号, 1993.
- 4) W. L. Stutzman and G. A. Thiele : Antenna theory and design, John Wiley and sons., 1976.
- 5) J. D. Kraus, Antennas : McGraw-Hill, Ney York, 1988.

- 6) R. F. Harrington : Time-harmonic electromagnetic fields, McGraw-Hill, New York, 1961.
- 7) A. A Smith : Calculation of site attenuation from antenna factors, IEEE Trans. On Electromagn. Compat., EMC-24, pp.301-316, Aug. 1982.
- 8) A. A Smith : Standard-site method for determining antenna factors, IEEE Trans. On Electromagn. Compat., EMC-24, pp.316-322, Aug. 1982.
- 9) American National Standards Institute, American National Standard for calculation of antennas used for radiated emission measurements in electromagnetic interference (EMI) control, ANSI C63.5, 1988.

関連発表論文

1. 森岡,小見山,佐藤,増田 : 「オープンサイトにおけるダイポールアンテナ測定の比較」(1999年電子情報通信学会総合大会)
2. 森岡,小見山,佐藤,増田 : 「オープンサイトにおけるダイポールアンテナの3アンテナ法測定」(1999年6月電気学会計測研究会)
3. 小見山,森岡,矢嶋,船津,池田,鈴木 : 「アンテナ測定用オープンサイト設備」(1999年6月電気学会計測研究会)
4. 森岡,小見山,中嶋 : 「オープンサイトでのダイポールアンテナ間減衰」(2000年電子情報通信学会総合大会)
5. K. Komiyama and T. Morioka : ETL open-area site for antenna measurement, CPEM2000, Sydney, May 2000.
6. T. Morioka and K. Komiyama : Measurements of antenna characteristics over different conducting planes, CPEM2000, Sydney, May 2000.
7. 森岡,小見山,中嶋 : 「半波長ダイポールアンテナによるオープンサイトの評価」(2000年6月電気学会計測研究会)

関連ラボ

電磁界計測ラボ

(Electromagnetic Field Measurement Lab.)

研究項目及び研究期間

長波長マイクロ波超合成ラジオメータの観測パラメータの研究

(平成9年度～12年度)

電磁界強度分布の精密測定技術に関する研究

(平成9年度～13年度)

当該研究担当者等

ラボ構成員(総数4名)

職員(4名) 小見山耕司*, 森岡健浩, 廣瀬雅信, 川上友
暉(光技術部)

* ラボリーダー