

## 原子分子データ応用フォーラム会報 第3号

*The forum for atomic and molecular data and their applications*

## 目次

- ・ 研究紹介  
小さなラボの X 線顕微鏡で細胞をみてみたい！ (東口武史)
- ・ 関連会議等 参加報告
  - POSMOL2013 (田沼 肇)
  - ICPEAC2013 (加藤太治)
  - シンポジウム：データベースの構築と活用 (池田 圭)
- ・ 2012 年度 原子分子データ応用フォーラムセミナー

原子分子データ応用フォーラムは、科学技術を支える、原子分子データに関心をもつ、大学、研究機関、企業の研究者、技術者が集って設立した特定非営利活動法人 (NPO) です。宇宙物理や、核融合のような基礎研究から、プラズマプロセス、環境汚染物質処理、光源などの応用分野で、プラズマのモデリングに用いられる、精度、信頼性の高い原子分子データの生産、データベース化、利用普及を図るために、基礎・応用分野の研究者、技術者が、それぞれが持つ原子分子データのニーズとシーズのマッチングを行なう場として設立されました。現在、フォーラムでは、セミナーの開催、インターネットコミュニティの運営などの活動を行なっています。本会報では、フォーラムの活動報告、ならびに参加者のみなさんの研究活動等をご紹介します。フォーラムの活動をより科学技術に役立つものにするため、ご意見をお寄せくださいましたら幸いに思います。

NPO 法人原子分子データ応用フォーラム 理事長 村上 泉 副理事長 佐々木明

## ■ 研究紹介

小さなラボの X 線顕微鏡で細胞をみてみたい！

東口武史 (宇都宮大学)

立秋という言葉は「暦の上では」が普通になり、お盆もう終わるなあ、と冷たい飲み物に手が伸びていたときに、首都大の田沼先生から、作文してくれないか、とのメールが届いた。恥ずかしながら、このフォーラムに参加したのは昨年 12 月が初めてであり、いきなりこんなところで、若造がしゃしゃりでてきていいの？という思いながら、謝礼は飲み会で、に即答し、いろんな原稿を後回しにして書くことにした。お気楽に書いて下さい、とのことで、ソフトに書くことにするが、これでいいのかしら？

さて、まずは自己紹介。若造だと思っているが、今年不惑。惑いまくっている一地方大の一教員。工学部電気電子工学科の中で、やれレーザーだ、やれ放電だ、やれ X 線だ、やれ顕微鏡だ、あっ、講義だ、学生実験

だ、と過ごしている。研究内容は、よく考えてみると、原子分子データ応用フォーラムに関わる内容多し。大学教員になったときにスタートした半導体露光用 13.5 nm 極端紫外 (EUV) 光源開発に加えてもらったことが縁で、多くの先生に勉強させてもらい、光源研究がしんどくもやりがいがあることをたたき込んでもらった、そんな者である。ここ 3 年ぐらいは、波長域で 2~4 nm, 6.x nm, 13.5 nm, 40 nm やらの VUV-X 線光源を実験している。

さて、こんな場でいうのもなんだが、 $^{50}\text{Sn}$  が 13.5 nm,  $^{54}\text{Xe}$  が 10.6 nm あたりに強い放射をもつ UTA (unresolved transition array) はなかなかどうして高出力である。そんなわけで、半導体分野での EUV 光源には、スズプラズマ EUV 光源が開発されているのはご存じの通りである。エネルギー変換効率も大きく、研究開発のすさまじさか、レーザーエネルギーから狭い帯域の EUV 光へのエネルギー変換率は 4% 以上にもなっている。つまり、数 100 mJ 級のレーザーシステムでプラズマ放射源をつくり、所望の波長に変換する

と、数 mJ のエネルギーを取り出せるようになっている。しかも、波長 13.5 nm には Mo/Si の多層膜鏡があるので、点光源の EUV 光をある程度集めることもできるようになっている。詳しくは、いろんな解説や文献、Web を参照されたい。

さて、波長 13.5 nm の光源が実用化されていないのに時期尚早ではあるが、半導体分野では次の短波長化についても動きがあり、光源と多層膜捕集鏡の組み合わせの点から、6.x nm の波長の可能性がある。未知数  $x$  が入っているのは、まだ波長が決まっていないからである。多層膜鏡の反射率は、理論的には 70% 近いそうで、実験的にも年々反射率が改善してきている。最近では、50% の反射率を確保できるまでに進展してきている。さあ、光源はどうする？ 必要になるか要らないか分からないが、研究してみるの自由である。そんなわけで、Sn-13.5 nm の光源方式を踏まえて実験してみると、 $^{64}\text{Gd}$  や  $^{65}\text{Tb}$  の UTA 放射は 6.x nm をそれなりに高効率に放射してくれた。さらには、高効率化には、Sn の知見をそのまま生かすことができることも分かった。

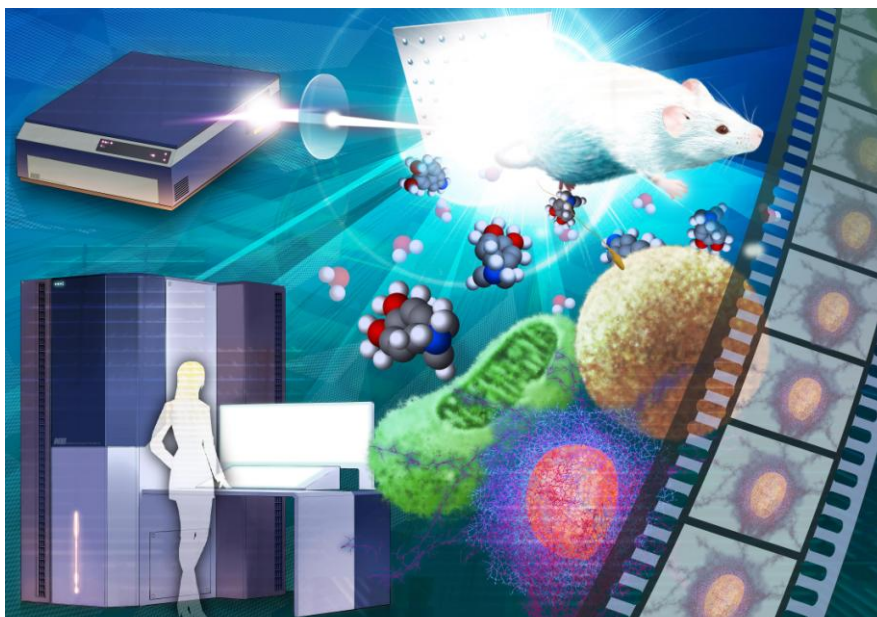
波長 13.5 nm の光源の効率はよい。波長が半分の 6.x nm もそこそこ良い。更に半分の波長は？ ご存じの方も多い、水の窓と呼ばれる軟 X 線がそこにある。波長は 2.3 nm から 4.4 nm のところに、ごくごく限られた電磁波スペクトルに、窓がある。この波長域は昔から研究されてきていて、水の窓軟 X 線顕微鏡に関わったことある方多数。私はどう見ても後発である。何を言いたいかというと、重元素で UTA 放射が高効率なら、水の窓軟 X 線光源も、これまでの半導体分野の光源研究の方法を踏襲してあげれば、つまり、重元素の UTA 放射を使うことができれば、小型で高効率化できるか

もしれない、なんて思ったわけである。

さて、ちょっと計算してみると分かるのだが、水の窓軟 X 線光源に適した元素は更に重くなり、放射性元素が増えてくる。その中で、非放射性の元素が  $^{83}\text{Bi}$  である。手持ちのレーザーで実験してみると 4 nm は強く光った。しかしである。予想したスペクトルと違う……。そうなのである。計算と比較しようにも重元素の多価イオンのデータは無いとは言わないが、その分野に疎い私には、そもそも正確な計算なんてできない。しかし、せっかちな私は、光源だけでなく、顕微鏡も用意しようとしている。だからこそ、光源もできれば早く作ってしまいたい。顕微鏡の光学系を設計するには光源のスペクトルが分からんといかん……。ということは光源の、重元素プラズマの、多価イオンの、スペクトルってどうなっている？ どうやったら、小型の光源が早くできる？ そんなことを考えていた。それが去年の夏から秋である。国内には放電もレーザーも高温プラズマ施設がある、荷電交換装置がある、電子ビームイオントラップ装置がある。使ったことはないけれど、計算したこともないけれど、人脈もあんまりないけれど、協力をお願いするとやってもらえるかもしれない、なんて甘っちょろい考えで、教えを、協力を請うと、親切な助言の嵐。なんとかなるような気がしてきた。

水の窓軟 X 線顕微鏡、こんなものが、小型でできると何がうれしいのだろう。ここから先は、先日、依頼されて書いた作文をまとめたものである。

生物分野では、iPS 細胞による再生医療研究が花盛り。細胞観察は多くの情報を含んでいることから、実に様々な顕微鏡が開発されている。しかしながら、生物細胞の中を「生きたままで見ると」のは困難を極める。



細胞を生かしたまま、つまり、水分が多い状態で、小さな組織をみることができるのは、水を通ることができるごくごく限られた波長域、つまり「窓」を持つX線、これが水の窓X線である。小型=省スペース、高効率=省エネルギーの水の窓X線ストロボの開発に注力している。

分かりやすいように1枚のイラストを用意した。左上にあるレーザー光はプラズマを発生するために用いられる。ここからは明るいストロボX線が発生する。これを細胞に照射して、X線顕微鏡により写真撮影する。対象とする生物細胞は無限にあるが、今は、マウスの受精卵や脳器官などを撮影しようとしている。今後の研究開発、さあてどうなることやら。ぜひご指導ご鞭撻の程。そして、乱文をお許し下さい。

## ■ 関連会議等 参加報告

### □ POSMOL2013

2015年春に東京-金沢間が開業予定の北陸新幹線の列車名が「かがやき」、「はくたか」、「つるぎ」に決まったとの発表が10月10日にあった。東京郊外に住むものとしては、金沢までの所要時間が半分ほどになり、これからの金沢出張が楽になり楽しみにもなった。言うまでもなく金沢は北陸地方の中心都市であり、過度な大都市化を拒むように古い街並みを守っている。この街のシンボルとも言える金沢城址と兼六園にほど近い金沢市文化ホールにおいて、2013年7月19日から21日までの3日間に亘ってPOSMOL 2013が開催された。

POSはpositron, MOLはmoleculeの頭3文字であり、International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium PhysicsとInternational Symposium on Electron-Molecule Collisions and Swarms (EMS)という2つの国際会議が共同開催される場合の略称である。どちらもICPEAC (International Conference on Physics of Electronic and Atomic Collisions, 但し、現在のPはPhotonic)のサテライト会議として独立に開催されていたが、電子衝突と陽電子衝突には物理的興味や実験手法において共通する部分も多く、実際に電子から陽電子に研究テーマを変更した実験家もいるくらい近い関係にあった。そのため2005年から共同で開催されるようになり、会議自体が隔年のため今回は5回目のPOSMOLであった。

参加者は全体で140名弱、陽電子と電子の内訳は絶妙なバランスでほぼ均等であった。国際会議では開催

国が周辺分野からも参加者を募ることで総数を水増しするようなことも多々あるが、今回は80名以上が海外からの参加者であり、名実ともに国際会議になっていたことは特筆に値する。19日の午後から21日の夕方まで、5つの全体講演と7つのパラレル・セッション、および1つのポスター・セッションで構成されるプログラムで、 $5 + 22 \times 2$ 、合計49件の口頭発表と $41 + 38 = 79$ 件のポスター発表があった。私はこの会議の中で最も少数派であるイオン・スウォームの研究をしているため、陽電子に関する発表は殆ど聞いておらず、報告できるのはほぼスウォームと電子衝突に限定されることをお許し願いたい。

電子と分子の衝突過程では様々な現象が起こるが、この会議では解離性付着 (Dissociative Attachment, DA) に関する研究が約半数を占めている。口頭発表で7件、ポスターでは11件もがこのDAに関するものであった。中性分子に電子が付着すると同時に解離が起こる現象で、分子イオンに電子が再結合するとともに解離が起こる解離性再結合 (Dissociative Recombination, DR) との類似性が感じられるが、実験手法が全く異なるため同時に議論されることは稀である。DRでは生成物が中性粒子だけなので、検出するには解離片からの発光を観測するか、イオンを加速することで生成した中性粒子を高速で検出器に衝突させる必要がある。電子との相対速度を制御するには合流ビーム法が用いられるが、通常は加速器が必要で大掛かりな実験となる。しかし、DAでは必ず負イオンが生成するため、小さな実験室でも比較的容易に観測が可能である。DRについてはそれを主題にした国際会議が不定期ながら開催されているが、DAについてはそのような会議はなく、実質このEMSが最も集中して議論できる国際会議になっているようである。DA以外では、DNAや生体分子を標的にした散乱実験が相変わらず多く、振動的共鳴や負イオン共鳴を介した電子散乱が散見された。

スウォームも口頭5件、ポスター6件ほど集まったが、1993年までスウォームだけを主題として50名程度のシンポジウムが開催されていたときの熱気は最早欠片もないのが寂しい。プラズマ・プロセスに関係した全体講演を慶応大の真鍋さんをお願いしたが、それ以外に原子分子データ応用フォーラムに直接関係する断面積や輸送係数の報告は非常に少なかった。1995年に電子分子衝突と共同開催でEMSが始まった理由が、スウォーム研究者の高齢化と減少にあったと思われるので、この流れは避けられない。しかし、研究分野の消滅だけは避けたいと思って努力しているのだが、



世界的な潮流を変えるのは個人の力では無理である。強いニーズがあれば、それに応えられる研究者はまだ居ると思うので、本フォーラムが有効に機能してくれることを願っている。

私は国内組織委員として会議の運営も担当したので、裏話も紹介しておこう。今回の POSMOL は「サテライト会議を全て中国国内で開催する」という ICPEAC の方針と折り合わなかったため、ICPEAC のサテライトから初めて外れた。関係する分野の研究者が中国には殆どいないため、POSMOL としては日本開催が妥当だと判断した結果である。なお、会場を金沢に定めたのは、小松空港と上海空港の間に定期便が運行されていることと、石川県と金沢市には国際会議に対する助成金制度があるためであった。元々資金的には ICPEAC との繋がりにはなかったので開催に支障はなかったが、喧嘩別れしたような感があり少し後味が悪い。しかし、会議自体は成功を納め、参加者の評判も良かった。次回は 2015 年夏にポルトガルのリスボンで開催される。2 年間は短いがまた新しい成果を持って参加したい。

最後に、この場を借りて、chair として殆ど全ての準備作業を請け負って下さった長嶋泰之さん（東京理科大）と co-chair として秘書の業務を担当して下さい。星野正光さん（上智大）に残りの組織委員および参加者を代表して感謝の意を表したい。

田沼肇（首都大・理工）

## □ ICPEAC 2013

中国蘭州市内のホテルで開催（2013 年 7 月 24~30 日）された第 28 回 International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC) に出席した。本国際会議はこの分野では最も規模の大きなもの。中国開催は今回が初めてで、中国科学アカデミーの近代物理研究所が主催した。なお、会場のホテルは同研究所に隣接しており、会期中にロシアの技術協力によって同研究所地下に建設された中国最大規模の重イオン蓄積リングを見学した。

本会議の参加者総数は約 450 名であった。核融合研からの参加は 2 名（加藤、坂上）だが、電通大、首都大学東京、上智大学、西北師範大学などから共同研究者が多数参加した。会議のサイエンスセッションは 5 日間。口頭発表は 95 件（内訳は基調講演 5 件、プログレスレポート 58 件、特別レポート 32 件）で、分野の内訳は以下の通り。プログレスレポートと特別レポートは、パラレルセッションで行われた。

・ 光子衝突過程 35 件

・ 電子衝突過程 28 件  
 ・ 重イオン衝突過程 23 件  
 ・ 極低温原子・分子衝突過程 9 件

これに加えて、2013 年 IUPAP 若手科学者賞の受賞記念講演が 1 件：ゲーテ大学（ドイツ）の Till Jahnke 氏が、Interatomic Coulombic Decay に関する実験的研究成果を高く評価され受賞された。

ポスター発表は 5 回のセッションに分けて行われ、毎回 100 件を超える発表があった。会議で特に注目したのは、核融合エネルギー研究のためのタングステン多価イオン原子過程の新しいデータが各研究機関で精力的に生産されていることであった。ドイツの研究グループは、重イオン蓄積リングと電子クーラーリングを用いて、電子衝突電離断面積と再結合断面積を、20 価程度までの多価イオンについて meV 以下の低エネルギーから 1keV 程度までの衝突エネルギーで測定し、その結果を公表した。特筆すべきは、再結合断面積は従来の理論予測を数桁も上回る値であり、不純物イオンの分光スペクトルや輸送モデルで用いられる原子過程データの見直しが必要である。その他にも、タングステンに関する各種原子過程や表面との相互作用の研究成果が多数報告されていた。特に関係のあるポスター発表のタイトルを以下に挙げる。

- ・ Recombination of open-4f-shell  $W^{18+}$  ions with free electrons
- ・ Interaction of low energy carbon ions with tungsten surface
- ・ Fundamental Atomic Process in Source Development for Beyond EUV Lithography and "Water Window" imaging
- ・ Theoretical study of  $W^{25+}$  spectra
- ・ Spectroscopy of highly charged tungsten ions with a compact electron beam ion trap
- ・ 4f and 5p inner-shell excitations of  $W-W^{3+}$  ions
- ・ Interplay between elastic scattering and positron reemission from  $W(100)$  at low positrons energies
- ・ Polarization of the strongest  $nf \rightarrow 3d$  ( $n = 4, 5, 6$ ) radiative lines emitted from tungsten ions following EIE and DR processes
- ・ Dielectronic recombination of the 4p and 4d open sub-shell tungsten ions
- ・ Electron excitation of L-shell electrons from Ne-like and F-like tungsten ions
- ・ Single and multiple photoionization of  $W^{q+}$  tungsten ions in charge states  $q=1,2,\dots,5$

## experiment and theory

- Electron-impact ionization of multiply charged tungsten ions
- Effects of alkali metal coating on the emission of positronium neutral atoms and positronium negative ions from tungsten surfaces
- Electron emission from tungsten surface induced by neon ions
- MCDF calculation and analysis of M1 lines from tungsten ions in LHD and EBIT plasma

これらのいくつかは招待講演でも取り上げられ、参加者の興味を引いていた。ORNL の Fred Meyer 氏の招待講演では、タングステンへのヘリウム照射で生じる微細構造 (ナノバブル, Fuzz とよばれる) について発表があり、原子物理の専門家の注意を引いた。なお、本国際会議の招待講演、および発表されたポスターのアブストラクトは、IOP の Journal of Physics: Conference Series (オープンアクセスのオンラインジャーナル) に掲載される。また、7月25日に本国際会議の General Committee 会合で委員改選が行われ、著者が本委員会に参加することとなった。次回は2015年7月22~28日にスペインの古都、トレドで開催の予定。

加藤太治 (核融合科学研究所)

## □ シンポジウム：データベースの構築と活用

平成25年9月10日、東京大学の山上会館において、化学工学会の反応工学部会：CVD 反応分科会が主催するシンポジウムが開催されました。共催に CVD 研究会、協賛に应用物理学会プラズマエレクトロニクスおよび原子分子データ応用フォーラムという形で、我々のフォーラムからは、理事長の村上さん (核融合研究所) と田沼さん (首都大学東京) にご講演を頂きました。このシンポジウムでは、プラズマ以外に超臨界に詳しい先生方にもご講演を頂きましたが、プラズマ関係ではフォーラムのお二人の他に、慶応技術大学の真壁先生と東京エレクトロンの康氏からも講演して頂き、参加者総数も65名に達しました。この分科会では、元々は半導体製造プロセスで重要な役割を担う熱 CVD を中心とした成膜技術に関連するテーマを数多く扱ってききましたが、シンポジウムに参加される方の中にはプラズマ CVD 等の応用技術であるプロセスプラズマに興味を持つ方も少なくありません。汎用ソフトウェアを用いたプラズマシミュレーションが普及しつつある昨今、シミュレーションを活用する研究者にとっては、デー

タベースの構築とその活用が最大の課題になっています。

村上さんの講演タイトルは「核融合研における原子分子数値データベース活動と、世界における原子分子数値データベースの最近の動向」で、これまでもフォーラムセミナーでご紹介頂いている様々なデータベースや VAMDC の紹介の他に、我々フォーラムの活動についてもご紹介頂きました。田沼さんの講演タイトルは「meV から keV の衝突エネルギー領域における電子・原子・分子衝突素過程の実験的研究」で、ご専門の分野に関わる計測の立場からお話して頂きました。お二人の講演内容は、現状のデータベースやそのデータを準備するための技術の紹介で、シンポジウムの趣旨にもフォーラムの目的にもマッチしています。この他、真壁先生からは、「原子・分子データベースのプラズマシミュレーションにおける活用」というタイトルで分かり易い基調講演を、康氏からは「プロセスプラズマの反応モデル構築」というタイトルで CF 系を中心としたデータベース構築例をご紹介頂きました。シンポジウム参加者のアンケート結果では、今後のテーマの候補としてプラズマを含む反応速度論も含まれており、今後の活動に繋がるステップの一つという意味でも有意義なシンポジウムになったと感じています。

池田 圭 (アテナシス)

## ■ 2012年度 原子分子データ応用フォーラムセミナー

2012年12月11日~13日、標記研究会を下記の要領で開催した。プラズマ分光研究分野や原子分子物理、プラズマ応用分野などから多数の参加があり、お互いに情報交換と討論が活発に行われた。

場所：核融合科学研究所 研究1期棟4階会議室  
セミナープログラム

12月11日(火)

【タングステンプラズマの原子過程(1)】

13:30「タングステンイオンの EUV スペクトルのための衝突輻射モデルの評価」村上 (核融合研)

14:00「LHD でのタングステン多価イオン M1 遷移の観測と電離/再結合係数データ評価」加藤 (核融合研)

14:30「原子構造計算プログラム FAC による多価タングステンイオンのスペクトル解析」仲野 (原子力機構)

15:20「タングステンイオンの電荷変換衝突断面積測定」今井 (京大)

15:50 「Charge-changing collisions of tungsten and its ions with neutral atoms」 I. Yu. Tolstikhina (ロシア・レベデフ研)

17:30 懇親会

12月12日(水)

【タングステンプラズマの原子過程(2)】

9:00 「タングステン多価イオンと水素原子衝突における電荷交換反応断面積の絶対値測定」 副島(新潟大)

9:30 「可視光計測によるタングステンスパッタリング過程の研究」 酒井(東邦大)

10:00 「多価タングステンの電荷交換分光および電荷移行断面積測定」 田沼(首都大東京)

10:30 「CoBIT を用いたタングステン多価イオンの EUV 分光」 坂上(核融合研)

【酸素分子が関係する原子分子過程とその応用】

11:20 「電子衝撃による原子分子過程とスケーリング則」 星野(上智大)

13:00 「『プラズマシミュレーションに用いられるレート係数の推算方法の調査』分科会について」 池田(アテナシス)

13:20 「大気圧放電に接する液中に生成される活性酸素・活性窒素」 浜口(阪大)

14:10 「重粒子線による DNA 損傷に関わる原子分子物理、プラズマ物理」 森林(原子力機構)

14:40 「大気圧超高純度 O<sub>2</sub> 中における負イオン移動度測定」 奥山(千葉工大)

15:10 「電子衝突による分子ガスからの中性ラジカル生成断面積測定」 豊田(名大)

【次世代 EUV 光源(1)】

16:00 「光源の原子輻射過程の研究課題について」 佐々木(原子力機構)

16:20 「リソグラフィ用 EUV 光源開発の最新状況」 溝口(ギガフォトン)

16:50 「EUV アブレーションプラズマの分光観測」 西村(阪大)

17:20 「プラズマ光源関連イオンの EBIT による分光」

大橋(電通大)

12月13日(木)

【次世代 EUV 光源(2)】

9:00 「GRASP+RATIP を用いた多価イオンについての最近の計算について」 小池(北里大)

9:30 「LHD における希土類元素多価イオンの EUV スペクトル観測とレーザー生成プラズマとの比較」 鈴木(核融合研)

10:00 「高原子番号物質プラズマによる UTA EUV 光源」 東口(宇都宮大)

10:30 「金属ドロップレットのダイナミクス」 砂原(レーザー総研)

11:00 「レーザー生成 EUV ドロップレットのプレパルスレーザーによる膨張ダイナミクスの MD シミュレーション」 西原(阪大)

11:30 総合討論

12:00 原子分子データ応用フォーラム臨時総会

平成 25 年 10 月 30 日 発行

編者 田沼 肇 加藤 太治

発行者 特定非営利活動法人 原子分子データ応用フォーラム

〒509-5292 岐阜県土岐市下石町 322 番地 6

URL: <http://www.am-data-forum.com/>

E-mail: [staff@am-data-forum.com](mailto:staff@am-data-forum.com)