

ビームラインフロントエンドにおける エネルギー分解型 X 線ビームモニターシステム

公益財団法人高輝度光科学研究センター ビームライン技術推進室

工藤 統吾、佐野 睦、糸賀 俊朗、後藤 俊治

公益財団法人高輝度光科学研究センター 情報技術推進室

松本 崇博

国立研究開発法人理化学研究所 放射光科学研究センター

先端放射光施設開発研究部門

高橋 直

Abstract

ビームラインフロントエンドの準白色 X 線ビームの光軸を正確に捉えるモニターシステムの実証に成功した。本手法は、単結晶ダイヤモンド薄膜にビームを透過させて生じる散乱 X 線を、ピンホール光学系を通じて直接検出型 CMOS 二次元検出器で撮像するものである。得られる画像情報に光子エネルギー弁別を施すことで、アンジュレータ放射の各エネルギー成分の空間分布が可視化できる。この結果は、SPECTRA を用いた理論計算結果とよく一致した。本手法により得られた光軸情報は、従来の X 線ビーム位置モニターで問題となっていた偏向電磁石放射の混入の問題を回避できる。この新しいエネルギー分解型ビームモニターは、光源の超安定性を要求する回折限界リングの強力なビーム診断ツールとして期待できる。

1. 次期計画と XBPM

回折限界ストレージリング (DLSR) は、サブ nm rad の低エミッタンスを実現し、第 3 世代に比べ水平方向ビームサイズが大幅に縮小される^[1]。この結果得られる円形ビームをナノビーム集光することで、従来よりも 3 桁高い光子フラックスが得られる。ただし、これには光ビームの安定性 10 nrad を実現する必要があるとされている^[2]。

光位置モニター (X-ray Beam Position Monitor : XBPM) は光源点から 20~30 m 離れて光ビーム位置を観測することにより、光源の角度変動を敏感に捉えることができる。光源加速器の安定化には、電子ビームモニターだけでなく、光子ビーム位置モニターが必須であり、XBPM は DLSR のキーデバイスの 1 つである。

光源を診断する XBPM は、光学系ドリフトの影響を避けるため、光学系の上流に配置する必要がある。この条件を満たすのは、光学系上流のフロントエンド部に設置されている光電子放出を利用した XBPM である^[3-5]。しかしこれらは、アンジュレータ光軸の直接

観測ではなく周辺部の放射の測定によって光軸を推定するものである。周辺部には、偏向電磁石放射の混入があり、その計測値から光軸を推定するためには、補正が必要である。このため XBPM は、ユーザー利用運転中のビーム安定化には使われず、主にサイクル間などでの定点観測に用いられてきた。しかしながら、フロントエンドは先述の通り、光源角度変動を敏感にとらえることのできる唯一のロケーションであり、DLSR を目指す SPring-8-II において、是非とも活用しなくてはならない。

XBPM とは別に、我々はダイヤモンドを材料とし、光軸を直接見るビームモニターの開発にも取り組んできた^[6-8]。ダイヤモンド薄膜は、優れた耐熱性と X 線に対する透過性を持つ材料である。このため、多くの放射光および X 線自由電子レーザー (XFEL) 施設のビーム診断にダイヤモンド薄膜によるビームモニターが使用されている^[9-11]。

XFEL の光は光軸中心に集中し、優れた単色特性を備えている。そのため、ダイヤモンド薄膜の可視光発光による単純なスクリーンモニターでも、SACLA で

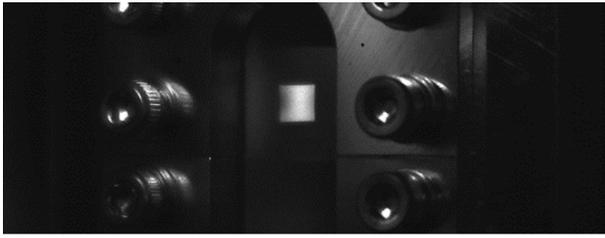


図 1 ダイヤモンド薄膜の可視光発光による SPring-8 の分光器上流でのアンジュレータ光の可視化。

は 100 nrad の分解能を実現し、安定な光軸制御に寄与している^[12]。しかし、同じ方法をリング加速器のアンジュレータ光観測に適用することはできない。リング加速器のアンジュレータ放射は高次光を含む様々な光子エネルギーが広い範囲に分布する^[13]。ダイヤモンド薄膜を可視発光型のスクリーンモニターとしただけではプロファイルが平坦になり、ビームの重心を検出できない。図 1 は、SPring-8 の分光器上流でのアンジュレータ光をダイヤモンド薄膜の可視光発光で見たものである。蓄積電流を 10 mA まで下げ、試験的に 3.2 mm × 2.8 mm (H × V) の大きなフロントエンドスリット (FE slit) サイズにした。ビームは FE slit の形のまま四角に見える。分光を行わずにビーム形状を正確に観察することは困難である。なんらかの原理によりエネルギー分解能を持つ光ビームモニターが必要である。

2. エネルギー分解してビームを見る

フロントエンドの準白色ビームを、分光器を用いずにエネルギー分解するには工夫が必要である。例えば、アンジュレータ光をエネルギーフィルターに透過させれば、意図するエネルギーの光子を遮断することができる。図 2 は一次光ピークを 18.48 keV にチュー

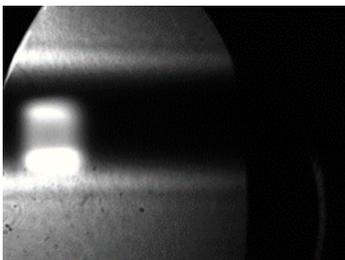


図 2 ダイヤモンド薄膜の可視光発光による SPring-8 の分光器上流でのアンジュレータ光の可視化。Zr 板を高速でビーム上を通過させ、その下流で観察した。

ニングしたアンジュレータ光を Zr 板 ($t = 0.1$ mm) に透過させ、下流でダイヤモンド薄膜の発光を見たものである。Zr の K 吸収端 (18 keV) により一次光ピーク近傍が遮断され、中央が凹んだビームを得た。この試験は、強力なフロントエンドのビームの熱負荷に Zr 板を耐えさせるため、水冷した上で高速移動させ、ビームをよぎる瞬間をカメラでとらえている。工夫すれば分光器を用いずともフロントエンドのビーム中心を観察することはできる^[7]。

しかしビームに直接フィルターを入れるのは、熱負荷と真空度の問題以外に、フィルター材料によって決まったエネルギーでしか使えないという制限がある。我々は、なんらかの方法で、ビームエネルギースペクトルとその空間分布を保持したまま、あたかもレプリカのように光軸外に取り出す方法を考案すべきだという結論に達した。それによりまず熱負荷の問題を回避しなければ、エネルギー分解方法の R&D を行うことができない。

ところで、フロントエンドの水冷 Be 窓などからの散乱を、シリコンドリフト検出器 (Silicon Drift Detector : SDD) を用いて測定すればアンジュレータ光のスペクトルを得ることが可能である^[14]。この方法は、FE slit のスキャンとの組み合わせにより光軸を明瞭に計測できることもわかっている。これはスキャン測定であるため時間を要するが、定点観測の有力な手段となり得る。水冷 Be 窓の散乱はアンジュレータ光のスペクトルの情報を保持しているのである。

我々は以上のことから、薄膜からの散乱をなんらかの方法により光軸外でビームの形にもどすことができれば、究極のビームモニターになるであろうと考えた。熟考の末、それにはピンホールカメラが有効であるとの結論に達した。ピンホールは通過する光のエネルギーを全て保存するので、ビームエネルギーと空間分布のレプリカを光軸外に移すという目的に合致している。

図 3 は、この考えに基づくエネルギー分解型光ビームモニターシステムの構成である。フロントエンド射出ビームをダイヤモンド薄膜に透過させ、その前方 30 度上方の散乱を、ピンホールを通じて二次元検出器で観測する。二次元検出器としては、光子エネルギーを計測し得るものを用いる。

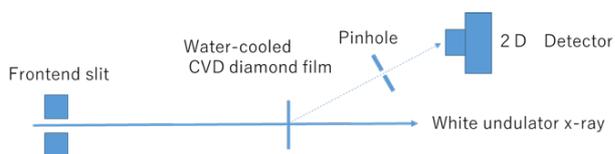


図3 ピンホールカメラを用いるX線ビームモニターシステムの模式図。

3. ピンホールカメラでビームを見る

アンジュレータ光は水平方向に直線偏光しており、弾性散乱には方向性がある。また高次光ではコンプトン散乱の寄与が増え、純粋なアンジュレータ光のスペクトルから乖離してゆく。このような状況で果たして、ピンホールカメラはビームモニターとして本当に機能するのであろうか？単純な構造とはいえ、ビームラインの分光器上流に新しいコンポーネントとして、このコンセプトのモニターを設置するにはコストも手間もかかるため、慎重な検討が必要である。筆者らは、この装置の製作に先立ち、ある形状のビームがダイヤモンド薄膜に当たって出てくる散乱が、ピンホールを通じてどう見えるかというシミュレーションをPHITS 3.10^[15]により行った。図4は、ビームを円環形状とした場合のピンホールカメラ画像である。コンプトン散乱と弾性散乱の寄与などにより、どのような形状が得られるか懸念したが、計算上は図4のようにビーム形状の像が得られることがわかった。

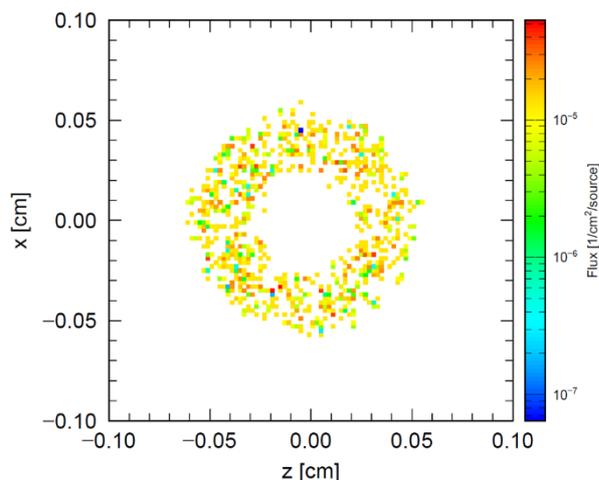


図4 45度傾けた厚さ30 μm のダイヤモンドに単色X線を入射し、ダイヤモンドの真横1cmの位置に、半径100 μm のピンホールをもうけ、さらに1cmの位置でのプロファイルを計算した。ビーム形状は半径500 μm 、太さ100 μm の円環形状とした。

このシミュレーションは単色ビームを仮定しているが、検出器にエネルギー分解能があれば、図4のようなビーム形状を、エネルギー毎に分解して絵にすることができるということになる。

4. エネルギー分解型ビームモニター

エネルギー分解したビームをとらえるキーポイントは、ダイヤモンド薄膜の品質と、二次元検出器の性能である。

SACLA で用いられているフォトルミネッセンスを利用したビームモニターにはBドープした多結晶ダイヤモンド薄膜が用いられている^[6]。図3の構成のビームモニターは、多結晶だとピンホールカメラ画像に大量の回折スポットが出現し著しく画質が劣化する^[16]。一方、最近単結晶ダイヤモンド薄膜の価格は格段に下り、単結晶ダイヤモンド薄膜にコスト的な問題はなくなった^[7]。そこで散乱体としては単結晶ダイヤモンド薄膜 ($t = 70 \mu\text{m}$) を用いた。もちろん、単結晶でも決まった位置に強い回折が出ることになるが、計算によると、ピンホール位置に回折が飛び込んでくる確率は極めて少ないことがわかっていてる。

二次元検出器として、当初エネルギー分解能に優れた液体窒素冷却 CCD カメラで R&D を進めた^[6]。これは優れたエネルギー分解能 ($\Delta E = 200 \text{ eV}$) がある反面、フレームレートが遅く、エネルギー分解画像を取得するのに長時間かかる。リアルタイム性が重要なビームモニターとして失格である。実用的な精度で光軸付近の成分を切り出すだけなら、エネルギー分解に対する要求水準を緩和してよい。我々は理研の開発した直接検出型二次元検出器 SOPHIAS-L^[18,19] ($\Delta E = 2 \text{ keV}$) を採用した。更に、1光子のエネルギーを正確に算出する高速ドロップレット解析アルゴリズムを開発し、SOPHIAS-L のデータ取得プログラムに組み込んだ^[17]。

本ビームモニターは SPring-8 BL05XU 光学ハッチの最上流に設置した。BL05XU の光源は、磁気周期長 32 mm、全長 3 m の真空封止型アンジュレータである。FE slit は、光源点から約 29 m 離れた位置に配置されている。さらにそこから 6.5 m 下流で、ビームはダイヤモンド薄膜を透過し、前方散乱 X 線 (上方 30 度) を、W 製ピンホール ($t = 500 \mu\text{m}$, $\phi = 10 \mu\text{m}$)

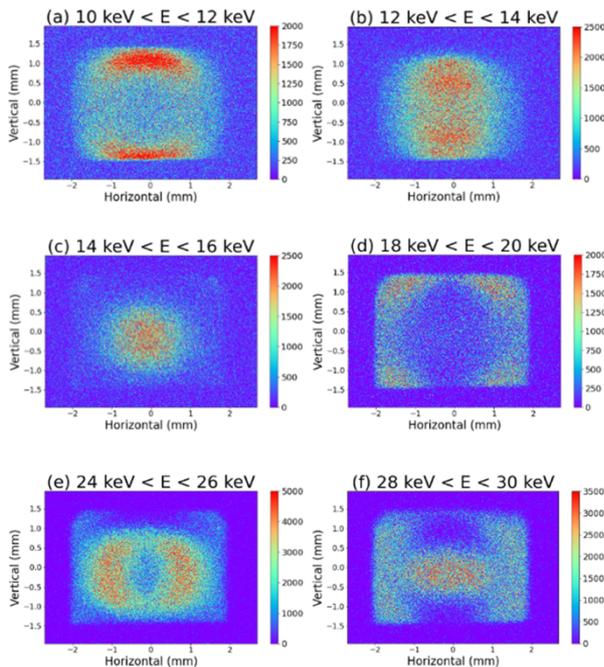


図5 一次光 12.4 keV を与えるアンジュレータ光のエネルギー分解画像。

を通じて SOPHIAS-L^[20] 上で像として検出した。ダイヤモンド薄膜からピンホールまでの距離は 19.4 cm、ピンホールから検出器までの距離は 40 cm であり、倍率約 2 倍のピンホールカメラとなる。

測定は、ビームライン調整の一部として行った。定常運転の 1/10 (10 mA) に蓄積電流を抑えることで、アンジュレータ GAP 17.26 mm (12.4 keV@1st) の設定で、FE slit の開口サイズを通常より広い 3.6 mm × 2.8 mm (H × V) にした。これにより、広範囲にわたるアンジュレータ放射の空間分布を観測することができた。

計測結果を図 5 に、またそれぞれに対応するエネルギーのアンジュレータ光の形状を SPECTRA で計算したものを図 6 に示す。

図 5(a) に示すように、低エネルギー光は、画像の上部と下部に分裂した。エネルギーが上がると、光は中心に寄ってゆき、一次光ピーク付近では図 5(c) に示すように、水平垂直とも中心にまとまる。さらに高エネルギーでは、上下方向と水平方向に分離し始める (図 5(d))。その後、図 5(f) に示すように、二次光が再び中心に集まる。

図 6 は、SPECTRA を使用して計算した各エネルギーのビーム形状である。図 6(c) は、一次光であり、光

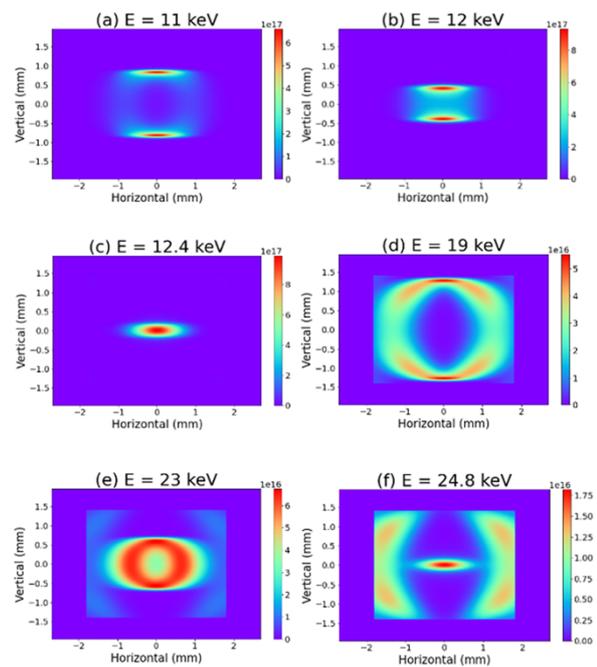


図6 SPECTRA により計算された、一次光 12.4 keV を与えるアンジュレータ光の各エネルギー成分の形状。

軸に鋭く集まっている。一方、(a) と (b) は低エネルギー成分である。(f) は二次光ピークであり、(d) と (e) は二次光の低エネルギー成分である。図 5 に示した本モニターにより得られた画像は、SPECTRA の計算結果とよく一致していることがわかる。エネルギー値の差異は、SOPHIAS-L のエネルギー分解能とアンジュレータスペクトル形状のコンボリューションによるものである。

5. まとめと展望

我々は、アンジュレータ光がダイヤモンド薄膜を透過して発生する X 線散乱をピンホールカメラで像とし、これを二次元検出器によるカラーイメージング技術で解析することで、初めて SPring-8 のアンジュレータ光のエネルギー空間分布を測定した。光の芯を捉えることに成功しているため、従来から言われ続けて来た偏向電磁石放射の混入の影響は無視できるレベルである。次期計画において、新しい光源としてリニューアルされた暁に、このタイプのビームモニタリングにより光がどのように仕上がっているかを観察できるということは、プロジェクトを進めてゆく上で大きな力となるだろう。

図 5(c) でわかる通り、現状では一次光のビームサイズはまだ大きく広がって見えている。これは用いた検

出器 SOPHIAS-L のエネルギー分解能が $\Delta E = 2 \text{ keV}$ (@5.9 keV:FWHM) が不十分なためである。図 6(c) の SPECTRA 計算は、エネルギー分解能 0.1% B.W. としている。これは $\Delta E \sim$ 数 eV の 2 結晶分光器レベルである。ここまでは無理としても、計算上では検出器の $\Delta E \sim 500 \text{ eV}$ 程度を実現できれば、FE slit 開口を実用的なサイズにしても十分光軸を捉えることができる。

本報告は蓄積電流を下げての試験結果であるが、実運用では、より多数の光子が検出器に入射する。更に SPring-8-II では、実効フラックスが 30 倍となる。これらは、リアルタイムモニターの観点からは有利である。

一方で、二次元検出器を用いたエネルギー分解画像処理は、一画素に複数光子が入射すると不可能となる。入射光子数が増えてもこの条件を満足するためには、フレームレートが 30 Hz の SOPHIAS-L では対応できず、数十 kHz レベルの高いフレームレートを有する二次元検出器が必要である。

つまり本ビームモニターが次期計画で活躍するためには、二次元検出器のエネルギー分解能、フレームレートが重要な項目になる。このような条件を満たす検出器として、我々は理研の開発している CITIUS に期待している^[21]。

エネルギー分解能とリアルタイム性において、改善すべき点を残しているとはいえ、我々は、SPring-8 が運転を開始してから、優に 25 年を過ぎても解決にいたらなかった問題、光軸の計測による光源の安定化、に一歩近づいたという手ごたえを感じている。

参考文献

- [1] P. Raimondi, N. Carmignani, L. R. Carver, J. Chavanne, L. Farvacque, G. Le Bec, D. Martin, S. M. Liuzzo, T. Perron, and S. White: *Physical Review Accelerators and Beams* **24** (2021) 110701-1-5.
- [2] M. Yabashi and H. Tanaka: *Nature Photonics* **11** (2017) 12-14.
- [3] H. Aoyagi, T. Kudo, H. Tanida and H. Kitamura: *AIP Conference Proceedings* **705** (2004) 933.
- [4] D. Shu, H. Ding, J. Barraza, T. M. Kuzay, D. Haefner and M. Ramanathan: *Journal of Synchrotron Radiation* **5** (1998) 632-635.
- [5] H. Aoyagi, Y. Furukawa, S. Takahashi and A. Watanabe: *Physical Review Accelerators and Beams* **24** (2021) 032803.
- [6] T. Kudo, S. Takahashi, N. Nariyama, T. Hirono, T. Tachibana and H. Kitamura: *Review of Scientific Instruments* **77** (2006) 123105.
- [7] S. Takahashi, T. Kudo, M. Sano, A. Watanabe and H. Tajiri: *Review of Scientific Instruments* **87** (2016) 083111.
- [8] K. Tono, T. Kudo, M. Yabashi, T. Tachibana, Y. Feng, D. Fritz, J. Hastings and T. Ishikawa: *Review of Scientific Instruments* **82** (2011) 023108.
- [9] J. Y. Park, Y. Kim, S. Lee and J. Lim: *Journal of Synchrotron Radiation* **25** (2018) 869-873.
- [10] R. van Silfhout, D. Pothin and T. Martin: *Journal of Synchrotron Radiation* **27** (2020) 37-43.
- [11] J. Morse, M. Salomé, E. Berdermann, M. Pomorski, W. Cunningham and J. Grant: *Diamond and Related Materials* **16** (2007) 1049-1052.
- [12] 田中均、後藤俊治、高野史郎、登野健介、正木満博、矢橋牧名、*放射光* **30** (2017) 28-38.
- [13] T. Tanaka: *Journal of Synchrotron Radiation* **28** (2021) 1267-1272.
- [14] S. Goto, S. Takahashi, T. Kudo, M. Yabashi, K. Tamasaku, Y. Nishino and T. Ishikawa: *Proc. SPIE* **6705** (2007) 67050H.
- [15] <https://phits.jaea.go.jp/indexj.html>
- [16] T. Kudo, M. Sano, T. Itoga, H. Tajiri, K. Ozaki and S. Takahashi: *Review of Scientific Instruments* **91** (2020) 033103.
- [17] T. Kudo, M. Sano, T. Itoga, T. Matsumoto and S. Takahashi, *Journal of Synchrotron Radiation* **29** (2022) 670-676.
- [18] T. Hatsui, M. Omodani, T. Kudo, K. Kobayashi, T. Imamura, T. Ohmoto, A. Iwata, S. Ono, Y. Kirihara and T. Kameshima, H. Kasai, N. Miura, N. Kuriyama, M. Okihara, Y. Nagatomo, M. Nagasaki, T. Watanabe and M. Yabashi: *Proc. Int. Image Sensor Workshop* (2013) Art. No. 3.05.
- [19] T. Hatsui and H. Graafsma: *IUCrJ* **2** (2015) 371-383.
- [20] M. Abe, F. Kaneko, N. Ishiguro, T. Kudo, T. Matsumoto, T. Hatsui, Y. Tamenori, H. Kishimoto and Y. Takahashi: *Journal of Synchrotron Radiation* **28** (2021) 1610-1615.
- [21] 初井宇記: 企画講演 7 動き出した次世代 X 線画像検出器 CITIUS 「高速・積分型検出器 CITIUS の開発」第 35 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム (2022 年 1 月 9 日)

工藤 統吾 KUDO Togo

(公財) 高輝度光科学研究センター
ビームライン技術推進室
〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1
TEL : 0791-58-0802 ext 3815
e-mail : kudo@spring8.or.jp

佐野 睦 SANO Mutsumi

(公財) 高輝度光科学研究センター
ビームライン技術推進室
〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1
TEL : 0791-58-0802 ext 3489
e-mail : musano@spring8.or.jp

糸賀 俊朗 ITOGA Toshiro

(公財) 高輝度光科学研究センター
ビームライン技術推進室
〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1
TEL : 0791-58-0802 ext 3391
e-mail : itoga@spring8.or.jp

後藤 俊治 GOTO Shunji

(公財) 高輝度光科学研究センター
ビームライン技術推進室
〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1
TEL : 0791-58-0802 ext 3840
e-mail : sgoto@spring8.or.jp

松本 崇博 MATSUMOTO Takahiro

(公財) 高輝度光科学研究センター
情報技術推進室
〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1
TEL : 0791-58-0802 ext 3270
e-mail : matumot@spring8.or.jp

高橋 直 TAKAHASHI Sunao

国立研究開発法人理化学研究所
放射光科学研究センター 先端放射光施設開発研究部門
〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1
TEL : 0791-58-0802 ext 3807
e-mail : takahasi@spring8.or.jp