微小傷検出システムの開発

- すばる天体望遠鏡における傷検出システムの検討 -

宮川 隆二*・重森 清史*・石松 賢治*・園田 増雄*

家 正則**・高遠 徳尚**・沖田 喜一**・宮下 暁彦**・佐々木 敏由紀**

久保田 弘***・中田 明良***

*電子部、**国立天文台、***熊本大学

Development of micro crack detection system for Large-scale mirror

Ryuji MIYAGAWA^{*}, Kiyoshi SHIGEMORI^{*}, Kenji ISHIMATSU, Masuo SONODA^{*} Masanori IYE^{**}, Naruhisa TAKATO^{**}, Kiichi OKITA^{**}, Akihiko MIYASHITA^{**}, Toshiyuki SASAKI^{**} Hiroshi KUBOTA^{***} and Akira NAKADA^{***}

すばる天体望遠鏡の主鏡に形成される微小な傷について、AE法で傷の検出及び位置特定が可能であるか検討した。模擬音源を用いた実験から、音波伝播モードは表面波の一種であるレーリー波が支配的で、その音速は3.280km/s であった。 音源からセンサまでの距離及び伝播時間から推定される距離を比較することで、表側に形成される傷の位置特定精度は 30mm 程度と見積もられた。さらに、主鏡稼動中の振動を測定することで、振動レベルは1mm 程度の傷から発生する音 波と同等かそれ以下で、周波数は2桁低いことがわかった。センサの最適化や信号処理を行うことで、表側に形成される 1mm 程度の傷を天体観測中においても検出できることを確認した。

1. はじめに

国立天文台はハワイのマウナケア山頂にすばる天体 望遠鏡(以下すばると呼ぶ)^{1,2)}を設置している。すば るの心臓部である主鏡(反射鏡)は、高純度の超低膨 張ガラスで製造され、直径8.3m、厚さ20cmと巨大で 薄い円板状^{1,2)}をしている。主鏡の裏側は、261本のア クチュエータにて支えられ、鏡面が常に理想双曲面を 保つように調整される。薄いガラス板に常時力を加え る方式のため、万が一傷が発生し放置すると最悪の場 合破壊に至る恐れもある。現在、主鏡表面の検査は、 数年に1度のメンテナンス作業の合間に目視にて実施 されている。しかし、一旦観測に入ると数年間傷の状 況を全く知ることが出来ないことから、観測中におい ても傷の状態を把握できるシステムが望まれている。

非破壊検査の代表格である光学カメラや超音波探触 子による傷の検査は、人による検査に近い方法であり、 傷の大きさを測定できるが、主鏡の全領域を対象とし た常時監視システムの構築は難しい。一方、AE(アコ ースティック・エミッション)計測法³⁾(以下 AE 法と 略す)は、固体の破壊に伴う AE 現象を検出する方法 であり、既存の傷の大きさは測定できない。しかし、 監視の立場からは、拡大しない安全な傷は検出せず、 拡大する危険な傷、及び、新たな傷の形成を選択的に 検出可能な方法である。AE 法で傷検出システムを構成 する場合、

- 主鏡全体を常時監視可能
- ・ 新しく発生した傷を即時検出可能
- 既存の傷の拡大を即時検出可能
- ・ 複数のセンサで傷の位置が特定可能
- ・ センサが小型軽量で可動部が無い
- ・ システムが単純で運用が簡単
- ・ 他方式に比較して低コスト

といった優れた特徴が期待できる。また、接着箇所の 異常など事前に予測が困難な異常も検出可能であるた め、主鏡だけでなくアクチュエータの異常も検出でき るという副次的な利点もある。近年、大型石油タンク のリスク管理^{4,5)}にも AE 法の利用が検討されており、 主鏡システム全体の安全管理への発展も期待できる。

以上の理由から、AE 法によるすばる主鏡部の傷の監 視は極めて有用と考えられるが、システムの実用条件 として、主鏡全域を対象に出来るだけ小さい段階の傷 を検出でき、また、その位置を人間の視野程度の精度 で特定できることが要求される。

熊本県は、平成11年から16年にかけ産学官による 地域結集型共同研究事業を実施し、異常放電監視シス テム⁶⁻⁸⁾を開発した。本システムは、半導体製造用プラ ズマ装置内で発生する微小な異常放電をAE法の原理 で検出する。近年、半導体やFPD(フラットパネルデ ィスプレイ)製造分野では、プロセス状態を様々なセ ンサにて監視し、工程改善を自動的に行うAPC(アド バンストプロセスコントロール)⁹⁾の導入が加速してお り、AE センサに対しプロセス監視の"耳"としての働きが期待されている。つまり、開発した異常放電監視 装置の適用範囲は今後さらに拡大することが期待され、 そのための技術基盤強化が重要である。

以上の背景の下、今回、すばる天体望遠鏡主鏡部の 傷検出システムを開発ターゲットとして、AE法による 異常監視システムの適用可能性の評価、及び、利用範 囲拡大のための基礎データの蓄積に取り組んだ。実験 では、実際の主鏡を用いて、位置検出精度を検証する ための音波伝播の測定、及び、天体観測中における常 時監視可能性を検証するための主鏡振動レベルの測定 を実施した。結果の概略は、既に天文学系学術講演会 で報告¹⁰⁾しているが、本報告では、その後の追加検証 を含めた説明を行う。

2. 実験

AE 波の伝播特性実験は、2003 年 8 月に実施された 主鏡メンテナンスの合間に行った。この時、主鏡は望 遠鏡から外されてアルミ蒸着用台座に載せられ、表面 のアルミ反射膜は剥がされた状態であった。



図1 AE センサの配置と計測の概要

図1は、伝播特性実験の全体概要を示す。微小な傷からのAE波に見立てた模擬音を主鏡上の複数点に入射し、端部に取り付けた3つのAEセンサで検出した。 模擬音は、直径6.35mmのトランスデューサV535 5.0/0.25(日本パナメトリクス製)に、20Vで1µs幅のパルス電圧を印加して発生させた。主鏡表面に傷をつけないよう、カップリング材としてポリエチレンシート(40µm)と純水を使用した。なお、主鏡と同じ超 低膨張ガラスのブロックを使った比較実験により、模擬音の振幅強度は1mm 程の傷が形成された時の音波 強度より小さいことを確認している。AE センサには、 直径20mmの200kHz 共振型センサAE204D(富士セラ ミックス製)を使用し、目的に応じて配置を変えた。 主鏡を汚さず且つ安定してセンサを固定するため、両 面テープを利用した着脱可能な自作ホルダを使用した。 AEセンサで検出した信号は、プリアンプで60倍に増 幅し、長さ10mの同軸線にてデジタルレコーダDL708E (横河電機製)に接続し、サンプリング速度2MS/sに て記録した。なお、図中に示していないが、パルス発 信器の出力はデジタルレコーダにも入力し、音波発生 時刻の確認に利用した。

主鏡駆動中の振動測定は、すばる望遠鏡が観測に使用されている期間の2003年7月の昼間に実施した。望遠鏡に組み込まれた主鏡の側面に、前述と同型のAE センサを取り付け、プリアンプで676倍に増幅し、デジタル・フォスフォア・オシロスコープTDS3012(テクトロニクス製)に入力した。天体観測時と同様、方位軸を中心として主鏡を回転させるアジマス回転動作と、高度軸を中心に主鏡面を傾ける動作をさせながら振動を計測した。

3. 伝播特性結果

波形の形状から、モードが異なると見られる複数の 信号が確認されたが、その中で傷の検出に有利な最も 振幅が大きい信号を選択し、その伝播特性を調べた。



図2 センサと模擬音源までの距離と伝播時間

図2は、検出された信号の伝播時間と、音源からセンサまでの距離との関係を示す。伝播時間は、信号が 急激に立ち上がる時刻から、パルス発生時刻を差し引 くことで求めた。なお、主鏡中央のカセグレン焦点用 穴の影になり、センサに音波が到達できない場合はプ ロットしていない。図から、伝播時間と伝播距離は極 めて良い比例関係にあり、大きな振幅を持つ信号が単 ーモードの音波であることと、主鏡材料が極めて均一 であることがわかる。最小2乗法で求めた近似直線の 傾きから、伝播速度は3.280km/s と見積もられ、信号 の主成分周波数が200kHzであることとあわせると、そ の波長は16.4mmとなる。

すばる主鏡材料の密度、ヤング率、ポアソン比から、 主鏡中を伝播する各種音波の伝播速度^{11,12)}を計算した 結果を表1に示す。本実験の伝播速度が、表面波の一 種であるレーリー波の音速に極めて近いことがわかる。 つまり、最も振幅の大きい信号は、主鏡の表面に沿っ て伝播するレーリー波によるものと考えられ、表面か ら波長程度の深さの層に局在¹²⁾していると考えられる。

表1 主鏡を伝播する音波モードと音速(理論値)

波の種類	音速	
自由固体縦波	5738m/s	
自由固体横波	3622m/s	
レイリー波	3283m/s	

位置特定精度を検証するため、伝播速度 3.280km/s を既知として、伝播時間からセンサと音源までの距離 を逆算し、実際の距離との差を調べた。その結果、44 データで標準偏差が28mmであった。今回の実験では、 模擬音源の座標値の誤差が10mm以上ある点を考慮す ると、真の精度は28mmより小さいと考えられる。し かし、実際の監視では発生時刻は知ることができず、 逆にセンサ数は増やすことが出来るなどを考慮すると、 30mm 程度の精度実現は期待できる。



図3 伝播距離と最大信号強度の関係

伝播距離と最大信号強度の関係を図3に示す。距離 8mにおける信号強度が、距離80cmにおける信号強 度と1桁も違わないことから、1つのセンサで主鏡全 域の傷を検出できることがわかる。図中の線は、最小 二乗法で求めた近似直線で - 0.494 の傾きを持つ。つ まり、最大振幅を持つ信号強度は、伝播距離の平方根 の逆数にほぼ比例しており、音波が2次元的に広がっ て伝播することを示している。これは、主たる伝播モ ードが、表面波の一種であるレーリー波であることと 一致する。また、この事実は、信号レベルの減衰が、 波の拡がりによるものが主で、材料による損失が非常 に小さいことも示している。



図4 端部反射波が観測される例

信号の中には、大きな振幅を持つ第2波が検出され る場合がある。図4は、表側の半径3070mm、角度60。 に音源がある場合に、表側端部に取り付けたセンサで 検出された信号波形を示す。音波発生から1.896ms後 に第1波が、2.425ms後により大きな振幅を持つ第2 波が到達している。伝播時間の比をとると、1.279と なる。一方、第1波が実線の経路1、第2波が角度 89.35°の端部点(入射角と反射角が等しい点)で反射 する点線の経路2を通るとすると、経路長はそれぞれ 6240mmと7980mmになる。経路長の比をとると1.279 となり、先に求めた伝播時間の比と等しくなる。つま り、主鏡端部でレーリー波が反射し、エコーとして検 出されたと考えられる。



図5 音源とセンサの位置関係

音源から発した音波が表面に沿って伝播し、端部で 一部が反射することを示したが、更に一部は側面に透 過し、残りは実体波に変換される。そこで、表側から 側面に透過する比率を調べるため、図5に示すように 音源とセンサA、Bを配置し、側面に進入する直前A 及び直後Bの振幅強度比を計算した。

表2 角部における側面への透過率

音源位置	A点の信号強度 Vpp (mV)	B点の信号強度 Vpp (mV)	A点に対するB 点の強度比
3-5	196	120	0.61
6-8	300	212	0.71

結果を表2に示す。強度比、つまり透過率は0.6~0.7 であった。De Bremaecker¹²⁾や佐藤¹³⁾らによって調べられ た角部におけるレーリー波の透過率も0.63であることか ら、今回の実験結果は妥当な値と考えられる。これらの 文献では、反射率も調べられており、約0.4 とされてい る。つまり、すばる主鏡においても、音源から出たレー リー波は、反射率0.4程度で反射していると考えられる。 なお、エネルギーで考えると、入射した表面波の36%が 側面に透過し、16%が反射し、残りの約50%が表面波以 外の実体波に変換されることになる。

4. 主鏡稼動時の振動測定結果

主鏡振動の測定結果を図6に示す。アジマス軸の回 転では、振動が観測されなかったため、主鏡の傾き角 に対する振動の変化のみ示している。



図6 主鏡の振動レベルと傷からの信号レベル

傾き角が小さくなると主鏡は垂直に近づき、それに つれて振動レベルが増加している。傾き25°では、傷 からの信号の最低レベル(約8m離れた地点での信号 レベル)と振動レベルがほぼ同程度になり、単純なレ ベルによる傷の検出は困難となる。しかし、振動周波 数は2kHzであることから、200kHzの成分を多く含む 傷からの信号をフィルタにて分離することは容易であ る。つまり、観測中においても、常時傷を検出するこ とは可能である。

5. まとめ

すばる天体望遠鏡の主鏡部に形成される微小な傷に ついて、AE法で傷の検出及び位置の特定が可能である か検討した。模擬音源を用いた実験から、音波伝播モ ードは表面波の一種であるレーリー波で、その音速は 3.280km/s であった。音源からセンサまでの距離及び伝 播時間から推定される距離を比較することで、表側に 形成される傷の位置特定精度は約 30mm と見積もられ た。

主鏡稼動中の振動を測定することで、振動レベルは、 1mm 程度の傷から発生する音波と同等以下、且つ、 傷検出の周波数より2桁低いことを確認した。よって、 センサの最適化や信号処理を行うことで、表側に形成 される1mm 程度の傷であれば、天体観測中において も検出可能であることが確認された。

本研究で得られた AE 法に関する知見は、半導体関 連装置や年々大型化する FPD 関連の製造装置の管理な どに適用して行く予定である。

文献

- 1)家正則,すばる望遠鏡,岩波ジュニア新書,岩波書店, 2003
- 2) 唐牛宏,宇宙の謎に迫る日本の大望遠鏡「すばる」 SUBARU,誠文堂新光社,2000
- 3)大津政康,アコースティック・エミッションの特性と理論,森北出版,2005
- 4)山田寛,真家敦子,廣川幹浩,本間恭二,湯山茂徳,李 王旺,第8回表面探傷シンポジウム講演論文集,製造検査 および保守における表面探傷,AE法による石油タンク底 部の腐食損傷評価に及ぼすスラッジの影響(社)日本非破 壊検査協会 表面探傷分科会 2005 年1月 20 日~21 日, pp25~28,2005
- 5)山田寛,関根和喜,橘川重郎,第8回表面探傷シンポジ ウム講演論文集、製造検査および保守における表面探傷, AE法によるタンク底部の腐食損傷診断,(社)日本非破壊

検査協会 表面探傷分科会 2005年1月20日~21日, pp29 ~34, 2005

- 6) Mitsuo YASAKA, Masayoshi TAKESHITA, Akikazu KODAMA, Kouji OKAMURA, Fumihiko UESUGI, Natsuko ITO, Ryuji MIYAGAWA, Muneaki HAGIWARA and Tadahiro OHMI, Micro Arc Monitoring by using Detection of Supersonic Waves emitted from Micro Arc Sites in Plasma Processing Chamber, Proceedings of ISSM2002[pdf], October 15-17, 2002
- 7) Mitsuo YASAKA, Masayoshi TAKESHITA and Ryuji MIYAGAWA, Detection of Supersonic Waves Emitted from Anomalous Arc Discharge in Plasma Processing Equipment, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.39, L1286-L1288, 2000
- 8) 八坂三夫,解説;半導体製造プラズマ装置の異常放電と 超音波,プラズマ異常放電の検出と部位標定(監視装置の 開発),超音波テクノ, Vol.14, No.3, p41-46, 2002
- 9) John A. Smith, K. C. Lin, Matt Richter, Uzi LevAmi, 多変量 解析を用いたリアルタイム FDC, Semiconductor International 日本版, Vol.2, No.3, pp38~42, 2005
- 10) N. Takato, R. Miyagawa, K. Shigemori, M. Iye, K. Okita, A. Miyashita, T. Sasaki, T. Usuda, M. Sonoda, H. Kubota, An experiment for developing a microcrack detection system for large thin mirror, ASTRONOMICAL TELESCOPES AND INSTRUMENTATION 2004, 21-25 June 2004 Glasgow, Scotland United Kingdom, Proceedings of the SPIE, Vol. 5495, p652-659, 2004
- 11) 菊池喜充,能本乙彦,実吉純一監修,超音波便覧,日刊工業新聞社,p1324,1985
- 12)柴山乾夫監修,弾性表面波工学(社)電子情報通信学会, コロナ社, p5
- 13) De Bremaecker, J.C., Transmission and reflection of Surface waves at a coaner, Geophysics, Vol. 23, p253-266, 1958
- 14) 佐藤泰夫,仁田原正道,枠組モデルによる弾性波伝播の 数値実験,鹿児島大学理学部紀要(地学・生物学),No.13, p105-120,1980