京都大学新技術望遠鏡 分割主鏡制御システム用
非接触精密位置センサーの開発

京都大学大学院 理学研究科
物理学・宇宙物理学専攻
宇宙物理学・天文学分野
修士課程 2 回生
坂井道成

2007 年 1 月 25 日

概要

京都大学理学部宇宙物理学教室、京都大学附属天文台、国立天文台岡山天体物理観測所、ナノオプトニクス研究所は、名古屋大学理学部光赤外線天文学研究室 (Z 研) と協力しながら、口径 3.8m の中口径望遠鏡の建設を平成 18 年度より開始した。この新望遠鏡は世界初の扇形分割主鏡を持ち、分割鏡制御/研削による非球面鏡製作/軽量架台等の新技術の開発・実証を目的とし、次世代超大型望遠鏡のプロトタイプとなるものである。完成のあかつきには岡山観測所構内に設置し、技術研究開発と共に、新しいサイエンスの開拓を目指す。

複数の分割鏡を並べて全体で一枚の鏡として機能させるには、各分割鏡の高さと傾きを $\lambda/20$ =50nm 程度の精度で制御する必要がある。そのためには、分割鏡の位置を 50nm の精度で測定する距離センサーが必要となる。その距離センサーとして、静電容量を測定するタイプのセンサーよりも安定性に優れたシグマ光機社製のインダクタンスセンサーを採用した。しかしこのセンサーでも、数日程度の期間にわたり必要な絶対的精度を保つことはできなかった。

そこで、センサーを冶具に固定した状態で長期間の安定性測定試験を実施し、環境変動のセンサーへの影響を調査した。その結果、測定値に温度と湿度に対する相関が見られた。そして温度と空気中の水蒸気量の二つを変数として補正することで、必要とされる安定性に近付けることに成功した。

この他にもセンサーの問題点とその対策について、1 週間以上の長期安定性、2006 年 10 月に納入されたインダクタンスセンサーの改良型コントロールボックスの試験結果などについても報告する。

目次

第 I 部　序論 4

第 1 章　新技術望遠鏡計画 5
1.1 計画の概要 5
1.2 開発・投入される新技術 6
1.3 設置場所 8
1.4 新技術望遠鏡の仕様 9
1.5 目指すサイエンス 10

第 2 章　精密位置センサー 15
2.1 分割鏡の位置合わせ精度と精密位置センサーの必要性 15
2.2 TMT の静電容量式エッジセンサー 17
2.3 HET 用の磁気式エッジセンサー 21
2.4 精密位置センサーに求められる性能。 22

第 II 部　新技術望遠鏡用精密位置センサーの実験とその結果 24

第 3 章　静電容量センサーと磁気センサーの比較 25
3.1 実験の動機 25
3.2 測定原理 26
3.3 実験方法 28
3.4 測定結果 28
3.5 環境変数による補正 30
3.6 その他のデータセット 35

第 4 章　インダクタンスセンサーの問題点 37
4.1 測定値のジャンプ 37
4.2 環境応答特性の反転 40
4.3 ノイズの発生 42

第 5 章　補正の有効性と、さらに長期の安定性 46
5.1 ～1 週間の安定性 46
5.2 >1 週間の安定性 47

第 6 章　温度変数 50
6.1 冶具温度と基板温度の比較 50
6.2 冶具/基板温度とインダクタンスセンサーの測定値の関係の詳細 51

第 7 章　改良型コントロールボックスの性能評価 53
7.1 新型・旧型、2 つのコントロールボックスを併用する場合の GND の設定 54
7.2 新型・旧型コントロールボックスの安定性の比較 56
7.3 新型コントロールボックスの補正 58

第 III 部　まとめ 61

第 8 章　結論 62

付録 A　全データセット 64

参考文献 102

第 I 部

序論

第 1 章

新技術望遠鏡計画

1.1　計画の概要

京都大学理学部宇宙物理学教室、京都大学附属天文台、国立天文台岡山天体物理観測所、ナノオプトニクス研究所は、名古屋大学理学部光赤外線天文学研究室 (Z 研) と協力しながら、口径 3.8m の中口径望遠鏡の建設を平成 18 年度より開始した。この望遠鏡は完成後、国立天文台岡山天体物理観測所構内に設置され、岡山観測所の 188cm 望遠鏡、兵庫県立西はりま天文台の「なゆた望遠鏡」(口径 2m) に代わる、国内最大の望遠鏡となる。また、この望遠鏡は将来の口径 30m 級の超巨大望遠鏡のプロトタイプとなるものであり、超巨大望遠鏡の建設に必須となる様々な新技術を開発・投入する。その新技術とは

- 分割主鏡
- 研削による非球面鏡製作
- 軽量架台

である。

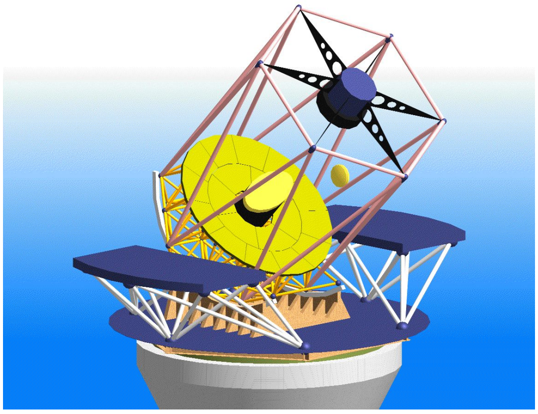


図 1.1　新技術望遠鏡。主鏡が 18 枚の扇形分割鏡で構成されている。

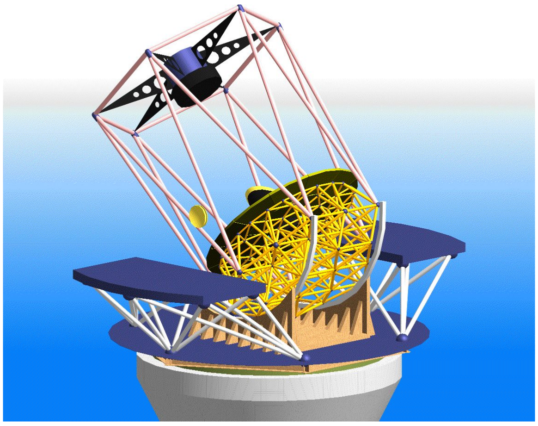


図 1.2　新技術望遠鏡裏側。主鏡を支える構造がトラス構造である。またそれを支える円弧上の構造が高度軸の R ガイドである。

現在日本が所有している最大の望遠鏡はハワイ、マウナケア山頂の「すばる望遠鏡」である。すばる望遠鏡の口径は 8.2m で大きな集光力を持ち、また補償光学を組み合わせての高い解像度を誇る。しかし一方では、

共同利用の望遠鏡であるため一つ一つの観測に割り振られる観測時間は短いものとなり、長期のプロジェクトや広域のサーベイ観測には適しているとは言いがたい。そのため、新技術望遠鏡のように大学を中心とした運用が可能な中口径の望遠鏡があれば、すばる望遠鏡では難しかった少数のプロジェクトに専念するような運用が可能である。よってすばる望遠鏡と相補的に天文学の発展を促すことが期待される。

1.2　開発・投入される新技術

1.2.1　分割主鏡

望遠鏡の基本的な性能のうち、分解能 $\Delta\theta$ は、主鏡の口径を D、観測する波長を λ とすると、円形開口の場合、

$$\Delta\theta = 1.22\frac{\lambda}{D}$$

で表される。すなわち、主鏡の口径を大きくするほど分解能は良くなる。(ただし、地上では大気の乱れによる効果があるので、中口径以上の望遠鏡で上記の分解能を実現するためには補償光学を併用する必要がある) また、望遠鏡の別の基本的な性能である集光力は D^2 に比例するため、主鏡の口径を大きくするほど明るい像が得られることになる。

以上のように主鏡の口径を大きくするほど望遠鏡の性能は上がる。しかし、単純に鏡を大きくしていくことには技術上・経済上の限界があり、直径 8m 程度が上限である。

そこで、それよりも大きな口径の主鏡を実現する方法が、分割鏡というアイデアである。直径が 1m～2m 程度の鏡を並べ、それらの相互位置を精密に制御してやることで、1 枚の巨大な鏡として扱うという技術である。

この方法は 1993 年に完成したアメリカの Keck 望遠鏡 (有効口径 10m) で採用された。Keck は直径 1.8m の六角形の分割鏡セグメントを 36 枚並べることで、10m の有効口径を実現している。分割鏡を採用している望遠鏡は Keck 望遠鏡のほかに、10m 級のものでは、SALT(South African Large Telescope)、HET(Hobby-Eberly Telescope)、GTC(the Gran Telescopio CANARIAS) があり、30m 超級の超巨大望遠鏡では、TMT(Thirty Meter Telescope)、OWL(OverWhelmingly Large)、Euro50 などが計画されている。さらには宇宙望遠鏡として口径 6.5m の JWST(James Webb Space Telescope) も計画されている。

これらの望遠鏡はアメリカもしくはヨーロッパが建設・計画している。一方で日本には分割鏡を採用した望遠鏡の建設の経験が無く、分割鏡の技術を持っていない。このことは、将来訪れるであろう 30m 超級の超巨大望遠鏡時代に日本の天文学が取り残されるおそれがあることを意味しており、分割鏡技術の開発は急務である。

また、新技術望遠鏡では Keck、SALT などで採用している六角形のセグメントではなく、扇形のセグメントを採用する。分割鏡セグメントが扇形をした望遠鏡は世界初の試みである。このような形状を採用した理由は、分割鏡セグメントの製作の効率化のためである。六角形のセグメントで非球面の主鏡を構成する場合は、主鏡が大型化するにつれて、必要な形状の種類が莫大なものになってしまう。例えば TMT の場合では、738 枚のセグメントを使うが、その形状は 123 種類ある。つまり同じ形状のセグメントは 6 枚しか含まれない。これは六角形のセグメントを敷き詰めた場合、中心からの距離が等しいセグメントは 6 つのみであることに由来する。一方で、扇形のセグメントでは大きな非球面の主鏡を構成しても、六角形のセグメントほど形状の種類は増大しない。例えば口径 30m の非球面鏡を直径 1m 程度の扇形セグメントを 15 周並べて構成した場合、同心円上に並んだセグメントの形状は同じなので、形状の種類は 15 種類で済む。このように形状の種類が少なくて済むということは、分割鏡セグメントの製作の際に少しの種類のものを大量に作ればよいということにな

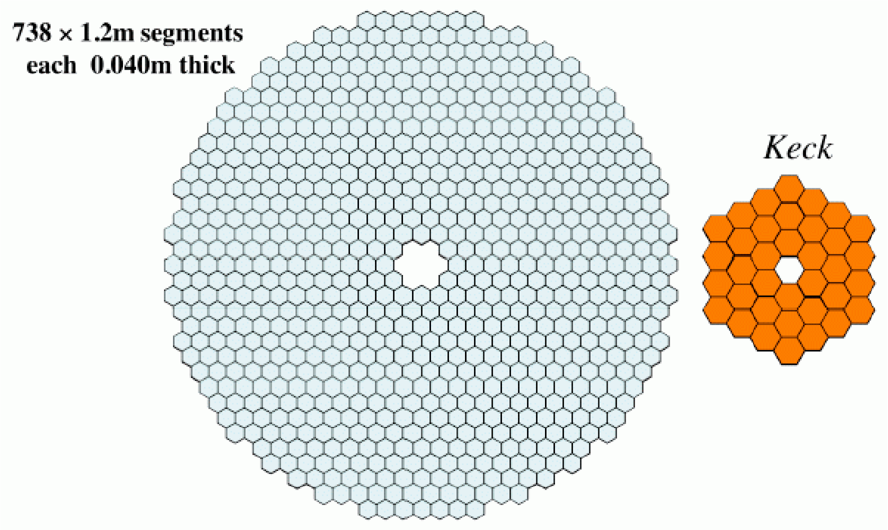


図 1.3　TMT の主鏡 (左) と Keck の主鏡 (右)。TMT は 738 枚、123 種類、直径 1.2m の六角形のセグメントを、Keck は 36 枚、6 種類、直径 1.8m の六角形セグメントを使用。[1]

り、多くの種類のセグメントを少量ずつ製作することに比べて大幅な効率化が見込まれる。扇形のセグメントは六角形のセグメントに比べて主鏡セルの構造が複雑になるという欠点があるが、上記のような利点も大きいので採用した。今回の口径 3.8m の大きさでは上記のような効率化の効果は効いてこないが、将来の超大型望遠鏡を建設する際の重要な経験となることは間違いない。

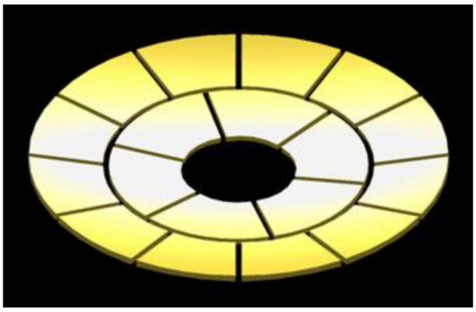


図 1.4　新技術望遠鏡の扇形のセグメント。同心円状に 2 周に配置するため、形状の種類は 2 種類

1.2.2　研削による非球面鏡製作

現在、天体望遠鏡の鏡を製造する際には、研磨することで鏡面を形成している。すなわち、鏡面を研磨剤 (酸化セリウムなど) をかけて、一定の力をかけて磨くことで形成している。この方法は優れた鏡面精度を出すことが可能である一方、非常に時間がかかり、また基本的には軸対称面しか磨くことができない。時間に関しては、大型の鏡を磨く場合は 1 枚につき数ヶ月から数年かかり、大量の分割鏡を使用する大型望遠鏡に使うには時間がかかりすぎる。また分割鏡の場合、各セグメントは非軸対称な非球面形状となる。そのため、研磨の際に鏡材の裏側から圧力を制御してやり鏡材を変形させ、研磨後に圧力を解放して非軸対称非球面鏡にすると

いう stressed polishing という技法を用いることになる。この方法も研磨であるため時間が掛かる上、正確な形状を得るには別な方法で最終的な補正加工をする必要がある。。

そこで新技術望遠鏡では、研磨ではなく研削、すなわち鏡材を砥石で削って鏡面を形作る方法を採用した。これまでは研削では必要な鏡面精度が出せなかったが、株式会社ナガセインテグレックスの開発した超精密加工技術を用いて、必要となる精度が出せることとなった。研磨に比べての研削の利点は、加工時間と任意の鏡面形状を作ることが可能な点である。

加工時間は、一枚の分割鏡セグメントを完成させるのに数週間しか掛からず、研磨で作る場合に比べて大幅な時間短縮が可能である。また、ナガセインテグレックスで製作中の研削盤には、名古屋大学で開発する鏡面形状の計測装置が組み込まれるため、機上計測が可能である。つまり、研削の途中で鏡面形状を測定する際、鏡の状態を変えずに調べることができるため、信頼性の高い結果が得られ、加工精度を高めることができる。

また、研削では砥石をコンピューター制御で動かすことによって任意の形状の鏡面を作ることができる。このことは必要とされる高次の非球面鏡の製作を非常に容易なものとしている。

1.2.3　軽量架台

望遠鏡の架台として最も強固で変形に強いのは、架台を壁を組み合わせて作る「壁構造」である。しかし、大型になればなるほど架台の重量は大きくなって制御に必要な力が大きくなり、また建設に掛かる費用も大きくなってしまう。そのため新技術望遠鏡では、架台を三角形の組み合わせで作る「トラス構造」を採用する。この方法では壁構造に比べて大幅な軽量化が可能で、しかも強固な架台を作ることができる。

また、望遠鏡の高度軸も従来の静圧軸受けを使わずに、「R ガイド」という機構を採用する。これは主鏡セルの裏側に円弧状のレールを設置して高度軸を動かす機構である。これは、主鏡を固定している主鏡セルを背後から支持することにより、構造を軽量化し、建造費用を抑え、次世代望遠鏡に必要な機構となるからである。

1.3　設置場所

この新技術望遠鏡が完成した際には、国立天文台岡山天体物理観測所構内に設置する。日本はハワイ、チリなどの世界的な天文サイトに比べて、シーイングや晴天率、人工光による光害などの点で大きく劣っている。それにも関わらず国内に設置するのは次のような理由がある。

1. 国内の光赤外線観測拠点とするため
2. 大型望遠鏡の技術開発拠点とするため
3. 大学生・大学院生の教育の拠点とするため
4. 世界の望遠鏡空白地帯を埋めるため

まず 1 つ目については、現在日本国内に存在する中口径望遠鏡は、岡山観測所の 188cm 望遠鏡と、西はりま天文台の口径 2m の「なゆた望遠鏡」が最大であり、それ以上のものが存在しない。日本での光赤外線観測の発展のためには、国内に 3m 以上の望遠鏡が必要である。

2 つ目については、この新技術望遠鏡は将来の超大型望遠鏡のプロトタイプであるため、多くの実験的な要素が含まれている。そのため新技術の開発とそれの望遠鏡へのインストール、またはトラブルへの対処などを考えた場合、望遠鏡は国内に設置して開発者・技術者が容易にアクセスできる環境にあるのが望ましい。

3 つ目については、国内に設置することで旅費が海外の天文台に観測に行く場合に比べて大幅に軽減される。そのため、大学生・大学院生でも容易にアクセスすることが可能であり、また大型の望遠鏡の使用経験は大きな教育効果を生むと考えられている。
4 つ目については、日本の周囲は 3m 以上の望遠鏡の空白地帯となっている。そのため、もし日本が夜の時間にガンマ線バーストなどの突発的な天文現象が発生した場合、その現象を大型の望遠鏡で詳細に観測することが不可能である。突発現象に対応するためにも、国内に 3m 以上の望遠鏡が必要である。

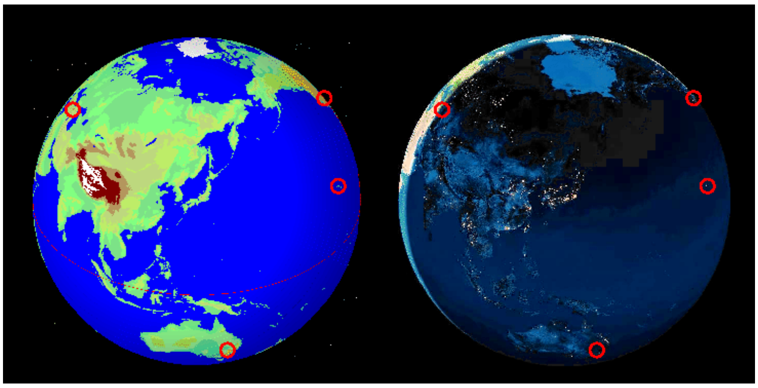


図 1.5　日本周辺の口径 3m 以上の望遠鏡の分布。赤い丸が望遠鏡の所在地。日本上空で発生した天文現象はこれらの望遠鏡からは地平線近くに見えるため観測できない。

以上の点から新技術望遠鏡を国内に設置するが、国内の中でも岡山を選んだ点については、岡山の観測条件の良さと、観測のためのインフラが整っていることが理由である。

図 1.6　国立天文台岡山天体物理観測所の全景。写真左の赤丸の場所が新技術望遠鏡の建設予定地である。写真右のドームが 188cm 望遠鏡。

1.4　新技術望遠鏡の仕様

新技術望遠鏡の光学系の仕様を表 1.1 に、機械的な仕様を表 1.2 示す。

架台形式		経緯台
光学系タイプ		Ritchey-Chretien
主鏡		
	口径	3.78m (1m×0.75m 扇形 segment×18)
	F 値	F/1.32
	材質	クリアセラム Z-HS
	合成鏡面精度	$< \frac{\lambda}{8}$
	セグメントの段差	<50nm
	1 セグメントの形状誤差	±1mm
副鏡		口径 1.1m
第 3 鏡		口径 1.1m×0.8m 平面鏡
焦点		ナスミス焦点 ×2
	ナスミス焦点 1	通常 合成 F/6
	ナスミス焦点 2	広視野、補正光学系込み 合成 F/6
視野		
	ナスミス焦点 1	12' × 12'
	ナスミス焦点 2	1°Ø
観測波長		
	ナスミス焦点 1	0.35μm - 4.2μm
	ナスミス焦点 2	0.50μm - 2.4μm
焦点スケール		110μm/1"
像質		視野全面にわたり 0.5"Ø以内にエネルギーの 80%
主鏡-副鏡間距離		3.7m
副鏡-第 3 鏡間距離		3m
第 3 鏡-焦点間距離		2.9m

表 1.1　新技術望遠鏡の光学系諸元

1.5　目指すサイエンス

1.5.1　ブラックホールの高速測光観測

これまでにもブラックホール (X 線連星) の可視光による観測は行われてきた。しかし数年前までは可視光では降着円盤の外側部分や伴星由来の (X 線を出す高温部分に比べて) 温度が低い部分の観測しかできず、それゆえにゆっくりとした変動しか観測されなかった。しかし、近年非常に周期の短い (∼数秒) 変動現象が観測されるようになった。[2]

図 1.8 は、3 バンドで観測した X 線連星の爆発現象である。B バンドは R バンドに約 20 秒遅れ、X 線は R バンドに約 7 分遅れている。可視光の変動の数分後に X 線が増光しているので、降着円盤のかなり内側の部分で起こっている現象なのではないかと考えられる。

全重量		≤15t
観測範囲		
	高度	$20° - 89°$
	方位	±270°
機械的稼動範囲		
	高度	$10° - 92°$
	方位	±270°
追尾精度保証範囲		
	高度	$25° - 88°$
	方位	±270°
駆動最高速度		
	高度	2°/s
	方位	3°/s
駆動最加速度		
	高度	$1°/s^2$
	方位	$1°/s^2$
指向精度		$<$ 3” (rms)
追尾精度		
	オープンループ	0.5” (10 分追尾)
	クローズドループ	0.25” (60 分追尾)
モーター分解能 (減速機構を含む)		
	高度	0.015”
	方位	0.015”
伝達および駆動機構		
	高度	フリクション
	方位	フリクション
観測装置サイズ		<1000kg, 1500W×1500L×1200H mm

表 1.2　新技術望遠鏡の機械的諸元

この現象は開放されたエネルギーの大きさ (5×10^{36}erg/s) とタイムスケール (数十秒) から、標準的な降着円盤とは状態の異なる領域で発生した、もしくはフレア現象として発生したのではないかと考えられる。

この他にもタイムスケールが 10 秒以下の細かい変動現象や、可視光と X 線での変動の発生時間のずれが観測されている。

これらの現象を解明するために、降着円盤やジェットがどういう状態のときに、どのようなタイムスケール、振幅、形状の短時間変動現象が発生するかを観測する必要がある。また、hard/soft X 線と可視光/近赤外線の同時観測を行い、波長による変動の時間的なずれを調べることができれば、ブラックホール近傍・ジェットなどの極限状態の物理を探ることができると考えられる。さらに、近年開発された高速測光 CCD を用いれば最短で 10 msec 程度のタイムスケールで観測が可能であり、短時間変動現象の観測に力を発揮することが

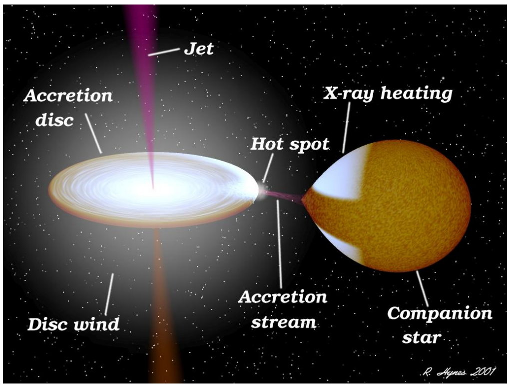


図 1.7　一般的な X 線連星の想像図。右側の伴星は太陽質量の数倍程度、温度は数千〜1 万 K 程度で主に可視光を放射する。左側のブラックホールの降着円盤は、外側部分では数千 K で主に可視光を放射し、ブラックホール近傍では数千万 K に達し主に X 線を放射する。ブラックホールから放射されるジェットは、根元部分では主に X 線を放射し、ブラックホールから離れるにしたがって温度が下がり、端のほうでは電波を放射する。ブラックホールと伴星の距離は太陽半径の数倍程度。公転周期は数時間〜数日。(©*Rob Hynes (Lousiana State University)*) [3]

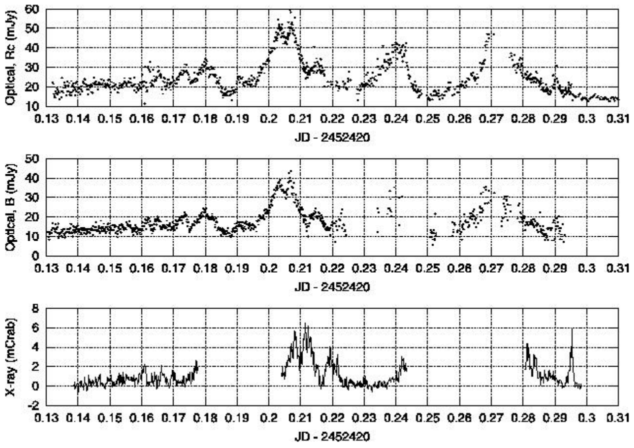


図 1.8　X 線連星 V 4641 Sgr. で 2002 年 5 月に観測された爆発時の光度曲線。上段が R バンド (可視光)、中段が B バンド (可視光)、下段が X 線で観測したもの。(Uemura et al.)

できる。

新技術望遠鏡に高速測光 CCD を用いた観測装置を搭載することで、可視光・近赤外線での短時間変動現象の観測に大きな口径を生かすことが可能である。可視光の高速測光は従来は技術的な制限のため行われてこなかったが、新技術望遠鏡での実現は日本の天文学界での先鞭をつけることになると期待される。

また、この高速測光技術の応用範囲はブラックホールの短時間変動現象の観測にとどまらず、

- ガンマ線バーストの残光現象の短時間変動
- 激変星の短時間変動
- 恒星フレア

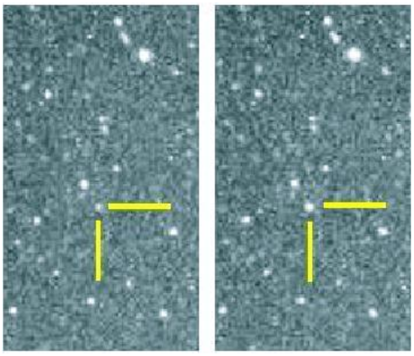


図 1.9　X 線連星 V 4641 Sgr.　で 2002 年 5 月に観測された可視光フラッシュ。左の画像を撮った 30 秒後が右の画像。(Uemura et al.)

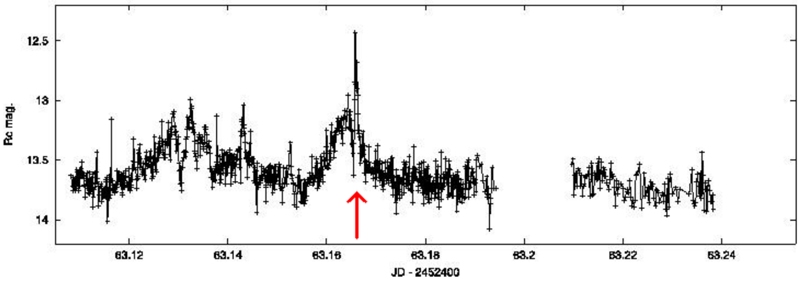


図 1.10　X 線連星 V 4641 Sgr.　で 2002 年 5 月に観測された可視光フラッシュ。30 秒で 3 倍に明るくなり、90 秒で元に戻っている。(観測の積分時間が 30 秒)(Uemura et al.)

- 恒星・白色矮星・中性子星の振動現象
- 食を利用した系外惑星探査

などにも有効であると考えられる。

特に、ガンマ線バーストの可視光の残光の短時間変動現象の観測では、ガンマ線バースト発生後、即座にその方向へ向けて観測を行うためには、すばる望遠鏡のような共同利用観測望遠鏡ではなく、新技術望遠鏡のようなプロジェクト観測向きの望遠鏡が望ましい。

1.5.2　星・惑星形成領域の観測

水素分子は双極子モーメントを持たないため、従来の方法では可視光/近赤外線領域では検出されなかった。しかし、分解能が 10 万を超える分光器を搭載することによって、従来は観測されなかった水素分子の四重極放射の吸収線が観測可能である。

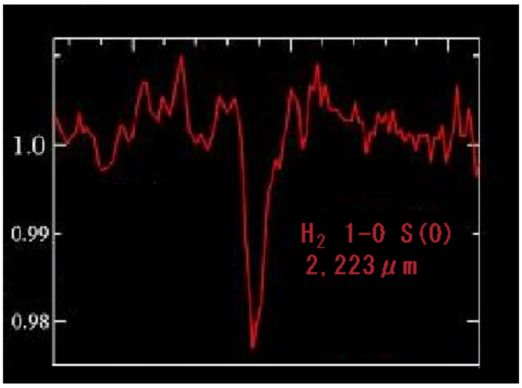


図 1.11　観測された水素分子の吸収線 [4]

これを用いて星形成領域で H_2/CO 比、オルソ・パラ水素比、ガス・ダスト比、温度等を求めることによっ

て、星形成領域の物理状態が解明される。さらに、電波での観測データとあわせることによって、星形成領域の物理、銀河の化学進化や星形成史などの解明につながると期待されている。

第 2 章

精密位置センサー

2.1 分割鏡の位置合わせ精度と精密位置センサーの必要性

光学系が無収差の場合、無限遠の点光源から来た平面波は焦点面に Airy pattern の回折像を作る。このときの光の強度が最大となる点をガウス焦点といい、Airy pattern の中心がそうである。光学系に収差があり、その結果波面収差が生じた場合、焦点面上で回折像の強度が最大になる点 (diffraction focus) は一般にガウス焦点とは異なる。また、diffraction focus における強度は同じ大きさの無収差の光学系のガウス焦点の強度に比べて小さい。Rayleigh は波面収差の最大値 (Peak-to-Valley 収差、P-V 収差) が波長の $\frac{1}{4}$ である場合、ガウス焦点における強度の低下が 20% 以下であり、この強度の低下は許容される量であることを示した *(Rayleigh tolerance)*[5]。この条件

$$P - V \text{ 波面収差} \leq \frac{\lambda}{4}$$

を Rayleigh の判定条件、または $\frac{\lambda}{4}$ 則という。

主鏡を分割鏡で構成する場合、セグメント同士の位置あわせの精度 (鏡面精度) は、反射することを考慮にいれて、上記の Rayleigh の判定条件から

$$\text{鏡面精度} \leq \frac{\lambda}{8}$$

である必要がある。(図 2.1) さらに、新技術望遠鏡では将来補正光学 (AO) を導入する場合に備えて、

$$\text{鏡面精度} \leq \frac{\lambda}{20}$$

の許容度を持たせることにする。観測波長が 1μm(近赤外線) の場合の鏡面精度は上式から 50nm である必要があることがわかる。

分割鏡セグメントの位置合わせの精度が 50nm であるので、分割鏡セグメントの位置を 50nm の精度で測定することのできる精密位置センサーが必要である。

2.1.1 非接触精密位置センサーの種類

精密位置センサーは測定方法によって何種類かに分けられる。その代表的なものは

- 静電容量センサー
- 磁気センサー
- 光学センサー

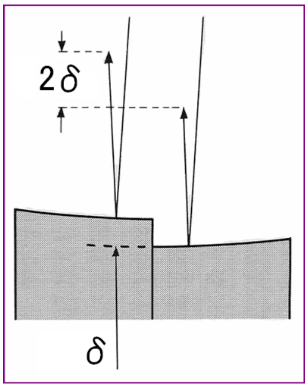


図 2.1　セグメントの間で発生する波面収差のイメージ図。波面収差 2δ を $\frac{\lambda}{4}$ 以下にするためには、セグメント同士の位置のずれ δ を $\frac{\lambda}{8}$ にすればよい。

- 超音波センサー

などである。以下にその特徴を列記する。

静電容量センサー

センサーの先端部を測定対象である対向金属面に近付けると、センサーヘッドと対向金属面がコンデンサーとなり、静電容量が生じる。このとき生じる静電容量 C は、センサーヘッドの面積を A、センサーヘッドと対向金属面の距離を d、誘電率を ε とすると、

$$C = \frac{\varepsilon A}{d}$$

と表される。ε は定数で、A は既知の量なので、C を測定すれば d が求められることになる。

静電容量センサーは高い精度が出せるため、分割鏡制御用の位置センサーとして採用されている。Keck、TMT などは静電容量センサーを採用している。

磁気センサー

センサーヘッドにコイルが入っている。センサーヘッドを測定対象の対向金属面に十分近付けた状態でコイルに交流電流を流す。すると磁場が発生し、対向金属面に誘導電流が生じる。その誘導電流が作る磁場とコイルの作る磁場が打ち消しあって、コイルのインダクタンス L が減少する。センサーヘッドと対向金属面の距離が近いほど L がより減少するので、L を測定することにより距離を測定する。

磁気センサーも高い精度が出せるため、分割鏡制御用の位置センサーとして採用されている。SALT、HET、JWST などは磁気センサーを採用している。

光学センサー

光を測定に使う光学センサーにはいくつかの種類がある。

センサーヘッドからレーザーを対向面対してに斜めに発射して対向面で反射させ、戻って来たレーザーの発射箇所からの変位で距離を測定するもの。

光ファイバーから光を対向面に発射して、反射して戻って来た光量を測定することで距離を測定するもの。(距離が近いほど戻ってくる光量が多い)

レーザー光を対向面に発射して、反射して戻って来たレーザー光と干渉させ、フリンジパターンを読み取ることによって距離を測定するもの。

などがある。方式によっては非常に高い精度が出せるが、センサー 1 点あたりの費用が高いため、大量に必要となる分割鏡制御用の位置センサーとして用いられた例は無い。

超音波センサー

対向面に超音波を発射して、反射して戻ってくるまでの時間から対象物までの距離を測定する。測定精度を分割鏡制御用に使えるまでに高めることが難しく、分割鏡制御用の位置センサーとして用いられた例は無い。

2.2 TMT の静電容量式エッジセンサー

代表的な分割鏡制御用の位置センサーとして TMT で用いられることになる静電容量式のエッジセンサーを紹介する [6]。

2.2.1 TMT の分割主鏡の制御

TMT の分割主鏡の制御方法は次のようなものである。まず分割鏡セグメントに水平な面内に x 軸と y 軸を取り、垂直方向に z 軸を取る。セグメントに対して水平方向のずれ (dx、dy) と回転 ($d\theta_z$) はセグメントを主鏡セルに固定することで防ぐ。セグメントに対して垂直方向のずれ (dz) と回転 ($d\theta_x, d\theta_y \equiv d\omega$) はセグメント背面に取り付けられたアクチュエーターで能動的にコントロールする。そのコントロール方法は、

1. 星の光を使い位相測定システム (alignment and phashing system, APS) で波面位相、すなわちセグメントの配置状態を測定する。そして望ましい主鏡の形状を決定し、z と ω の原点を求めて、アクチュエーターでその原点に調整する。
2. その後、観測中などはエッジセンサーで原点からのずれ dz と $d\omega$ を測定し、アクチュエーターで調整する。
3. 6 週間毎に 1. を行う。

APS を用いた波面位相の測定は 6 週間に一度行うので、その間の 6 週間は静電容量式のエッジセンサーとアクチュエーターで主鏡形状を保つことになる。

エッジセンサーの図を図 2.2 示す。

このエッジセンサーはガラスセラミックに金を蒸着することでコンデンサーの電極としている。また、図 2.2 の様に、電極は sense plate と drive plate の 2 種類に分かれている。これは 2 つの drive plate と 1 つの sense plate が作る 2 つのコンデンサーの電気容量 (図 2.2 中の C_1 と C_2) の差によって、sense plate に溜まる電荷を読み取るためである。また、センサーは分割鏡セグメントに磁石で固定される。

2.2.2 エッジセンサーで dz と $d\omega$ を測定する方法

各部分の変数を図 2.3 のように設定する。

すなわち、

- G: 2 つのセグメントのギャップ

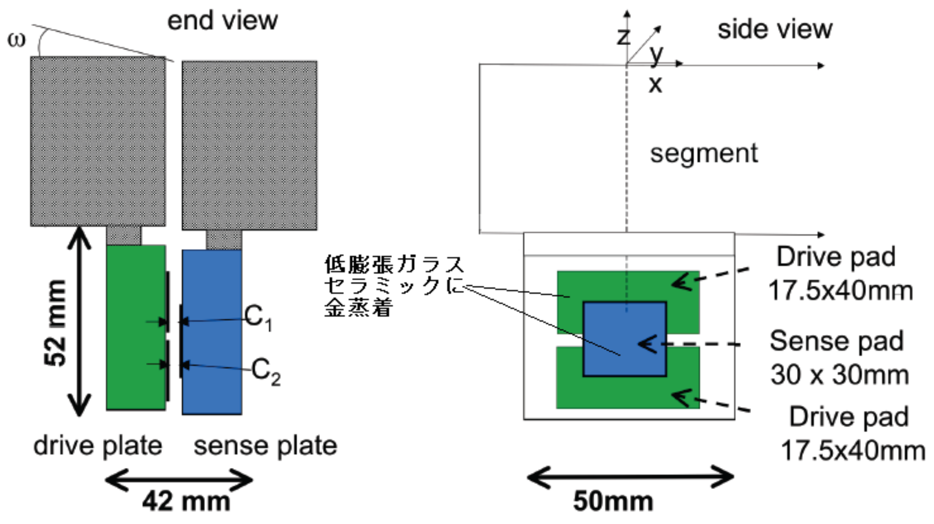


図 2.2　TMT のエッジセンサー

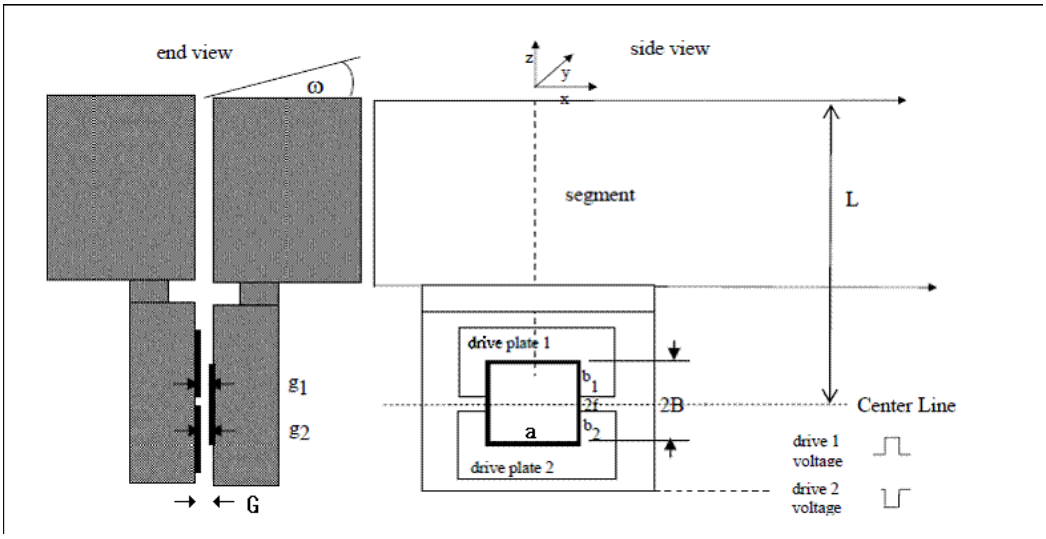


図 2.3　エッジセンサーの各部分の変数の定義

- g_1、g_2: drive plate 1、2 と sense plate のギャップ
- ω: セグメントの間の傾き ($= \theta_y$)
- a: sense plate の横の辺の長さ
- $2B$: sense plate の縦の辺の長さ
- b_1、b_2: drive plate 1、2 と sense plate の重なりの高さ
- $2f$: drive plate 1 と 2 のギャップ
- L: セグメント上端から drive plate 1 と 2 の中間までの長さ

さらに $\Delta\omega$、ΔB、ΔG を, 製造の際に生じたり、アクチュエーターで原点に調整した際に残ってしまった

ω、B、G の微小な誤差とする。そして、運用中に重力の変化や風、温度などが原因で起こった、アクチュエーターで補正すべきセグメントに垂直なずれと回転を dz、$d\omega(=d\theta_y)$ とする。

offset 電圧による微小な誤差の消去

ずれ dz と回転 $d\omega$ が生じていないとき、b_1、b_2、g_1、g_2 は

$$b_1 = B - f + \Delta B$$

$$b_2 = B - f - \Delta B$$

$$g_1 = G + \Delta G + (L - f - \frac{b_1}{2})\Delta\omega$$

$$g_2 = G + \Delta G + (L + f + \frac{b_2}{2})\Delta\omega$$

となる。

ここで drive plate 1 と drive plate 2 に図 2.4 のような正負が逆向きの電圧をかけてやる。
$(V_1 - V_2 = 2V, V_1 + V_2 = \Delta V)$

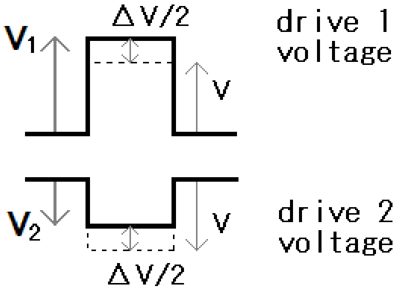


図 2.4　印加電圧

このとき sense plate に溜まる電荷 Q は、C_1、C_2 によって溜まる電荷を Q_1、Q_2 とすると、

$$\begin{aligned} Q = Q_1 + Q_2 &= \frac{\varepsilon a b_1 V_1}{g_1} + \frac{\varepsilon a b_2 V_2}{g_2} \\ &= \cdots = \left(\frac{2\varepsilon a B V}{G}\right)\left(\frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{(B+f)\Delta\omega}{2G}\right) \end{aligned}$$

ここで、

$$\frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{(B+f)\Delta\omega}{2G} = 0$$

となるように $\Delta V(=V_{offset})$ を調節してやると、微小な誤差 $\Delta\omega$、ΔB、ΔG の効果を打ち消せる。

dz と $d\omega$ の測定

V_{offset} を適切に調節して微小な誤差を消去してやった状態で、ずれ dz と回転 $d\omega$ が生じているとき、b_1、b_2、g_1、g_2 は

$$b_1 = B - f + dz$$

$$b_2 = B - f - dz$$

$$g_1 = G + (L - f - \frac{b_1}{2})d\omega$$

$$g_2 = G + (L + f + \frac{b_2}{2})d\omega$$

であるので、drive plate 1 と drive plate 2 に適切に offset された電圧をかけてやる。これは、微小な誤差が無いときに図 2.5 のように、正負が逆向きで大きさの等しい電圧をかけてやることに相当する。

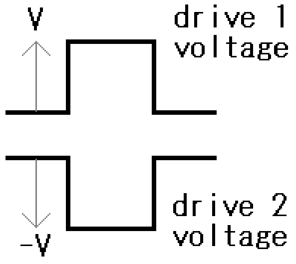


図 2.5　offset 済み印加電圧

もし $dz = 0$ かつ $d\omega = 0$ ならば、sense plate に溜まる電荷は打ち消しあって 0 である。$dz \neq 0$ または $d\omega \neq 0$ であった場合 sense plate に溜まる電荷 dR は、

$$\begin{aligned} dR = C_1V - C_2V &= \frac{\varepsilon a b_1 V}{g_1} - \frac{\varepsilon a b_2 V}{g_2} \\ &= \cdots = \left(\frac{2\varepsilon a V}{G}\right)\left(dz + \frac{B(B+f)}{2G}d\omega\right) \end{aligned}$$

ここで

$$L_{effective} \equiv \frac{B(B+f)}{2G}$$

と $L_{effective}$ を定義してやると

$$dR = \left(\frac{2\varepsilon a V}{G}\right)(dz + L_{effective}d\omega)$$

となる。dR の表式を見るとわかるように、測定された dR の値にはずれ dz と回転 $d\omega$ の情報が縮退してしまっている。そこで、図 2.6 のようにセグメントの 1 つの辺に drive plate と sense plate が逆になるような組合せで、エッジセンサーを 2 つ取り付ける。このような取り付けかたをすれば、2 つのセンサーで回転 $d\omega$ は同じ値を取るが、ずれ dz は大きさが同じで正負が逆 (向きが逆) の値を取るので、2 つのセンサーの測定値を連立させることで、ずれ dz と回転 $d\omega$ を求めることができる。

図 2.5 の電圧は 10kHz で印加する。そして、1000 回の出力を平均してやることで 20Hz でずれ dz と回転 $d\omega$ を測定する。

$dy(= gap\ change = dG)$ の測定

重力の変化、温度変化などによって、セグメント間のギャップ $G(= y)$ も変化する。dR の表式には G が含まれているため、ギャップが変化した場合、dz と $d\omega$ の測定に影響を与える。よってギャップの変化 dG を測

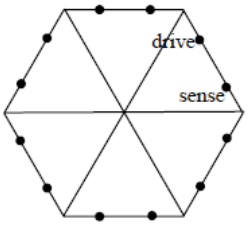


図 2.6　エッジセンサーの配置図。1 つの辺に 2 つのエッジセンサーを取り付けることで、情報の縮退を解いている

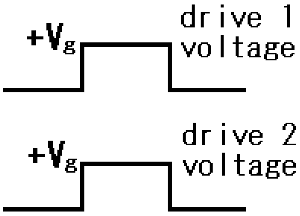


図 2.7　ギャップ測定用印加電圧

定する必要がある。図 2.5 のような dz と $d\omega$ の測定のための電圧を 1000 回印加するうち 2 回の割合で、図 2.7 のような正負が同じで大きさが同じ電圧を印加する。

このとき sense plate に溜まる電荷 R は、

$$R = C_1V_g + C_2V_g = \frac{2\varepsilon a V_g(B-f)}{G}$$

である。この電荷 R の変化を測定することでギャップの変化 dG を測定する。

2.3　HET 用の磁気式エッジセンサー

他の代表的な位置センサーとして、HET などで用いられている磁気式のエッジセンサーを紹介する [7]。

外観は図 2.8 で示したように位置のずれた渦巻状のコイルが 2 つついたものになっている。このセンサーを 2 枚 1 組にして向かい合わせて使用する (図 2.9)。2 枚のセンサーのうち 1 つは電流を流し、もう一方のセンサーには電流を流さない。

図 2.9 の一番上の図が、センサーのゼロ点の位置である。Active pair と書かれた方のセンサーのコイルに電流を流し、Passive pair と書かれた方のセンサーのコイルには電流を流さない。Active なコイルに電流を流すと磁束が生じ、向かい合った Passive なコイルにも誘導電流が発生する。すると、その誘導電流によって生じた磁束と Active なコイルの磁束が打ち消しあって、Active なコイルのインダクタンスが減少する。このとき、Passive なコイルとの重なりが多いほどインダクタンスはより減少し、逆に Passive なコイルとの重なりが少なければインダクタンスの減少は少ない。

今、Active なセンサーがゼロ点よりも上にずれたとき (図 2.9 の中段)、左側のコイルは Passive なコイルと

の重なりが減少するので、ゼロ点の場合に比べてインダクタンスは増加する。一方、右側のコイルは Passive なコイルとの重なりが増加するので、ゼロ点に比べてインダクタンスは減少する。Active なセンサーがゼロ点よりも下にずれたとき (図 2.9 の下段) は、逆のことが起こって左のコイルのインダクタンスは減少し、右側のコイルのインダクタンスは増加する。このように、Active pair のコイルのインダクタンスの増減を比較することでセグメントのずれが測定できる。

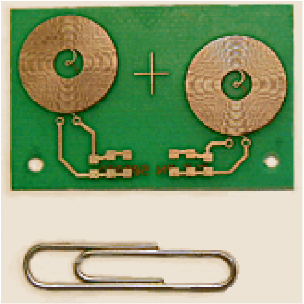


図 2.8　HET 用磁気式精密位置センサー。コイルが 2 つずれて付いている。

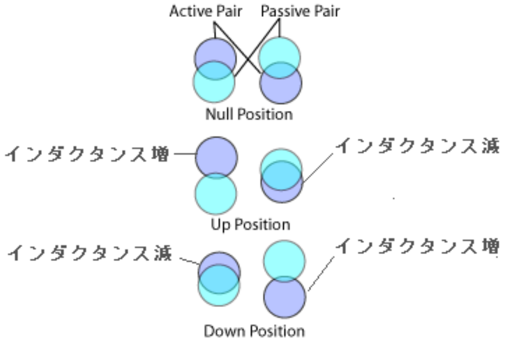


図 2.9　HET 用磁気式精密位置センサーの動作原理。

2.4　精密位置センサーに求められる性能。

精密位置センサーに求められる性能をまとめると

1. 50nm 以上の精度を持つこと。
2. 最低でも 1 晩以上は安定した測定が行えること。
3. 安価であること。
4. 小型・軽量であること。

である。

1. については既に述べたように、分割鏡が 1 枚の巨大な反射鏡として機能するためには、分割鏡セグメントを 50nm の精度で位置を制御してやらなければならず、そのためにはセグメントの位置を 50nm の精度で測定する必要があるからである。

2. については、センサーの安定性に問題があった場合は、もし分割鏡セグメントの相互位置にずれが発生していなくても、ずれが発生したと誤認してしまい、誤った補正をかけて鏡面精度が悪化してしまう恐れがあるからである。少なくとも 1 晩以上の時間安定していたら、観測中にそのようなことが起こることを防げる。また、位相測定システムで鏡面形状や分割鏡セグメントのずれを測定するという作業の頻度を減らすためにも、できるだけ長期間 (>1 週間) 安定した測定ができることが望ましい。

3. については、新技術望遠鏡の分割主鏡制御システムには 100 個程の精密位置センサーを使用する予定であり、30m 級の TMT では 4212 個もの精密位置センサーを使用する予定である。そのため、精度が良くとも 1 個あたりの単価が高いものは費用の問題から大量に使用することができない。

4. については、分割鏡セグメントは薄いガラスセラミックでできているので、精密位置センサーのような錘がつくと歪みが生じてしまう (図 2.10、図 2.11 参照)。歪みを小さく抑えるためにも、センサーは軽量である

ことが望ましい。

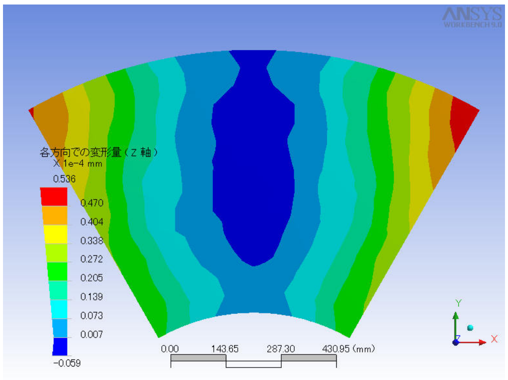


図 2.10　精密位置センサーが付いていない場合、セグメントを支持したときに発生するたわみのシミュレーション。左右両端が持ち上がり、中央部が凹む形状をしている。両端の最上点は +54nm、中央の最下点は-6nm である。

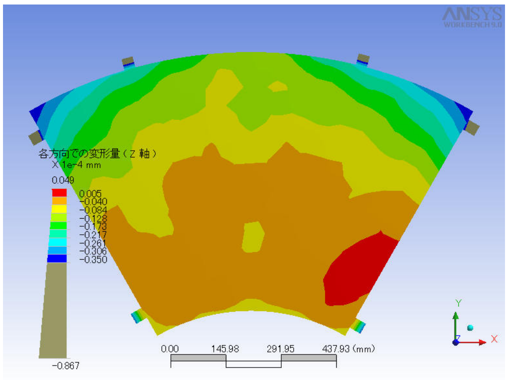


図 2.11　1 個 70g の精密位置センサーを 6 個取り付けた場合に発生するたわみのシミュレーション。センサーなしの場合とは逆に、センサーをつけた両端が凹み、中央部が押し上げられる形状になる。中央の最上点は +5nm、両端の最下点は-35nm である。

第 II 部

新技術望遠鏡用精密位置センサーの実験とその結果

第 3 章

静電容量センサーと磁気センサーの比較

新技術望遠鏡用の精密位置センサーの候補として、テクノシステム社製の静電容量センサーと、シグマ光機社製のインダクタンスセンサー (磁気センサー) の比較試験を行った。

3.1 実験の動機

始めは精密位置センサーの候補として、テクノシステム社製の静電容量センサーを考え、安定性試験を行っていた。試験では、対向金属面と位置センサーの間隔を固定して測定を行った (図 3.1)。しかし、静電容量センサーは短時間 (数時間) では必要とされる 50nm の精度を上回る精度を出すことができたが (図 3.3)、長期間 (>1 日) 連続して測定を行うと 50nm の安定した精度が保てないことがわかった (図 3.2)。

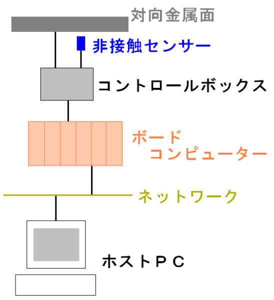


図 3.1　機器の配置。位置センサーと対向金属面の間隔は固定。

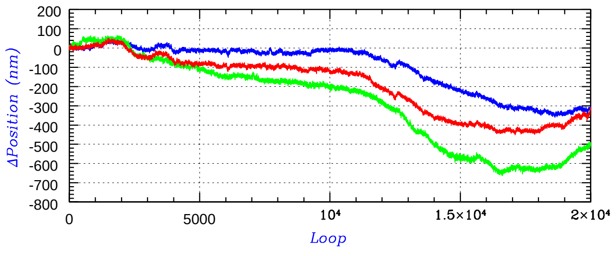


図 3.2　静電容量センサーの測定値。横軸は ～26 時間。データの取得は約 5 秒に 1 回行い、それを 20000 回連続して行った。測定開始時点の値からの増分を表している。数百 nm の変動が生じている。

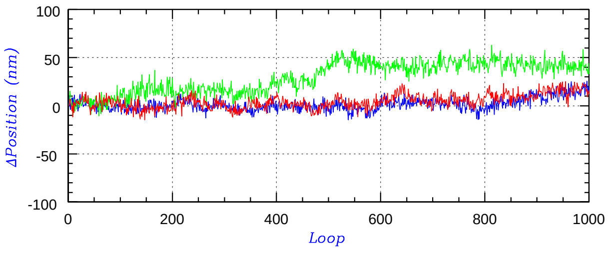


図 3.3　図 3.2 の始めの 1000 回測定の拡大図。横軸は ～80 分。測定開始時点の値からの増分を表している。このタイムスケールでは、50nm の精度を安定して出すことができる。

そこで、別の原理を用いて測定を行うセンサーを同時に試験して、安定性に優れたほうを採用するために、

今回の試験を行った。

3.2　測定原理

3.2.1　テクノシステム社製静電容量センサーの測定原理 [8]

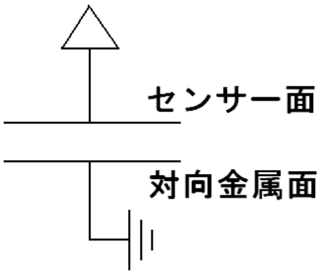


図 3.4　静電容量センサーの概念図。

センサーヘッドを対向金属面に十分接近させるとコンデンサーとなり、静電容量 C が発生する。この静電容量 C を測定することによって、

$$C = \frac{\varepsilon A}{d}$$

よりセンサーヘッドと対向金属面の距離 d が求められる。テクノシステム社製のセンサーは、このコンデンサーに交流定電流 (周波数 ω) を流して、コンデンサーのインピーダンス $\frac{1}{i\omega C}$ を測定することで、静電容量 C を測定する。

3.2.2　シグマ光機社製インダクタンスセンサーの測定原理 [9]

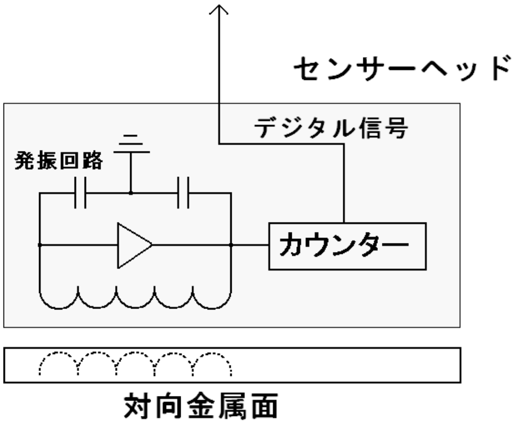


図 3.5　インダクタンスセンサーの概念図。

センサーヘッドの先端部に渦巻状のコイルがある。センサーヘッドと対向金属面を十分に接近させると、セ

ンサーヘッドと対向金属面の間が静電結合して分布キャパシタンスが発生する。この状態で先端のコイルに交流電流を流すと、分布キャパシタンスを通じて交流電流が対向金属面に流れ込み、渦巻状の電流が生じる。この対向金属面に生じた電流が作る磁束が、コイルを流れる電流が作り出す磁束と打ち消しあって、コイルのインダクタンス L が減少する。センサーヘッドと対向金属面が接近するほど、L はより減少する。この L を発振回路を使い発振周波数 f、

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

を測定することによって求める。ただし、表式中の C は回路の浮遊容量である。L と f の関係は線形ではないので、図 3.6 を用いて L を距離に直す。

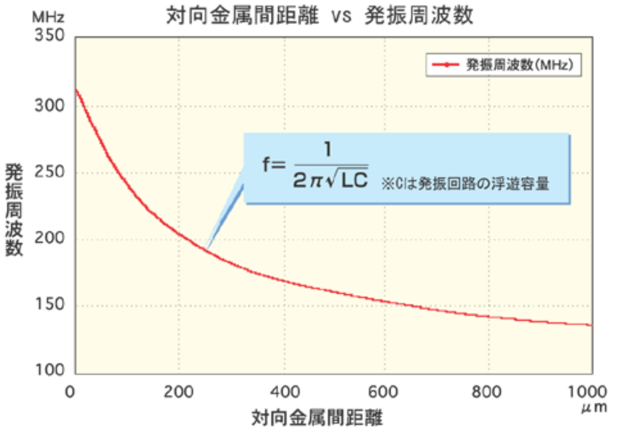


図 3.6　インダクタンス L と距離の関係

f の測定の仕方は次のようなものである。まずコントロールボックス内の回路で図 3.7 のようなステップ電圧を発生させてセンサーヘッドに送る。センサーヘッド内には発振回路とカウンターが内蔵されており、カウンターではステップ電圧が入力されている間の時間、すなわちサンプリング時間中に何回振動するかをカウントする。(サンプリング時間は 100μs、200μs、350μs 指定でき、長いほうが測定に時間が掛かるが、安定性は増加する。) サンプリング時間を τ、カウント数を n とすると、

$$f = \frac{n}{\tau}$$

である。(ただし、実際にはこのセンサーでは発振周波数と距離の関係ではなく、カウント数と距離の関係のテーブルを持っている。そのため上式のようにいったん f を求めてから距離に直さず、カウント数から直接距離に変換している。)

また、センサーヘッドにはデータをデジタル化する回路も入っており、センサーヘッドから出力されるデータはデジタル化されている。このことは、センサーヘッドからコントロールボックスの間で情報の劣化が起こりにくいことを意味しているので、安定性の向上に役立つことと思われる。

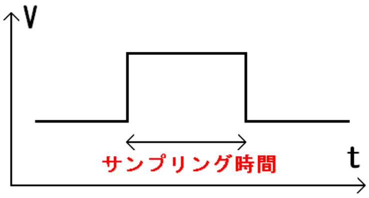


図 3.7　ステップ電圧。ステップ電圧の持続時間がサンプリング時間である。

3.3　実験方法

静電容量センサーとインダクタンスセンサーを図 3.8、図 3.9 のように同一の冶具に固定して、約 1 週間連続して測定を行う。測定回数は 100000 回、6.50 秒に 1 回測定する。センサーヘッドと対向金属面の距離は約 300μm である。また、周囲の環境変化の様子を見るために、各所に温度計を設置して同時に測定し、また気圧と湿度も同時に測定した。冶具は固定しているので、精密位置センサーで測定される距離は不変である (理想的な位置センサーを用いれば、測定開始時点からの測定値の変動は 0 である。)。

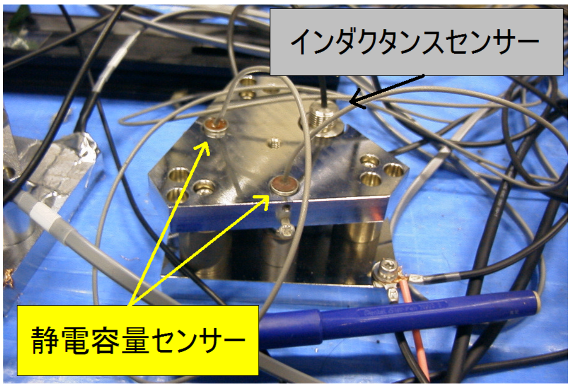


図 3.8　測定に用いた冶具

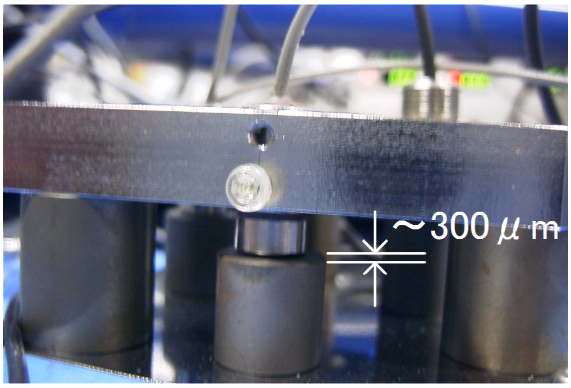


図 3.9　測定に用いた冶具を横から見た図。センサーヘッドと対向金属面の間隔は～300μm。

3.4　測定結果

測定結果を図 3.10 に示す。

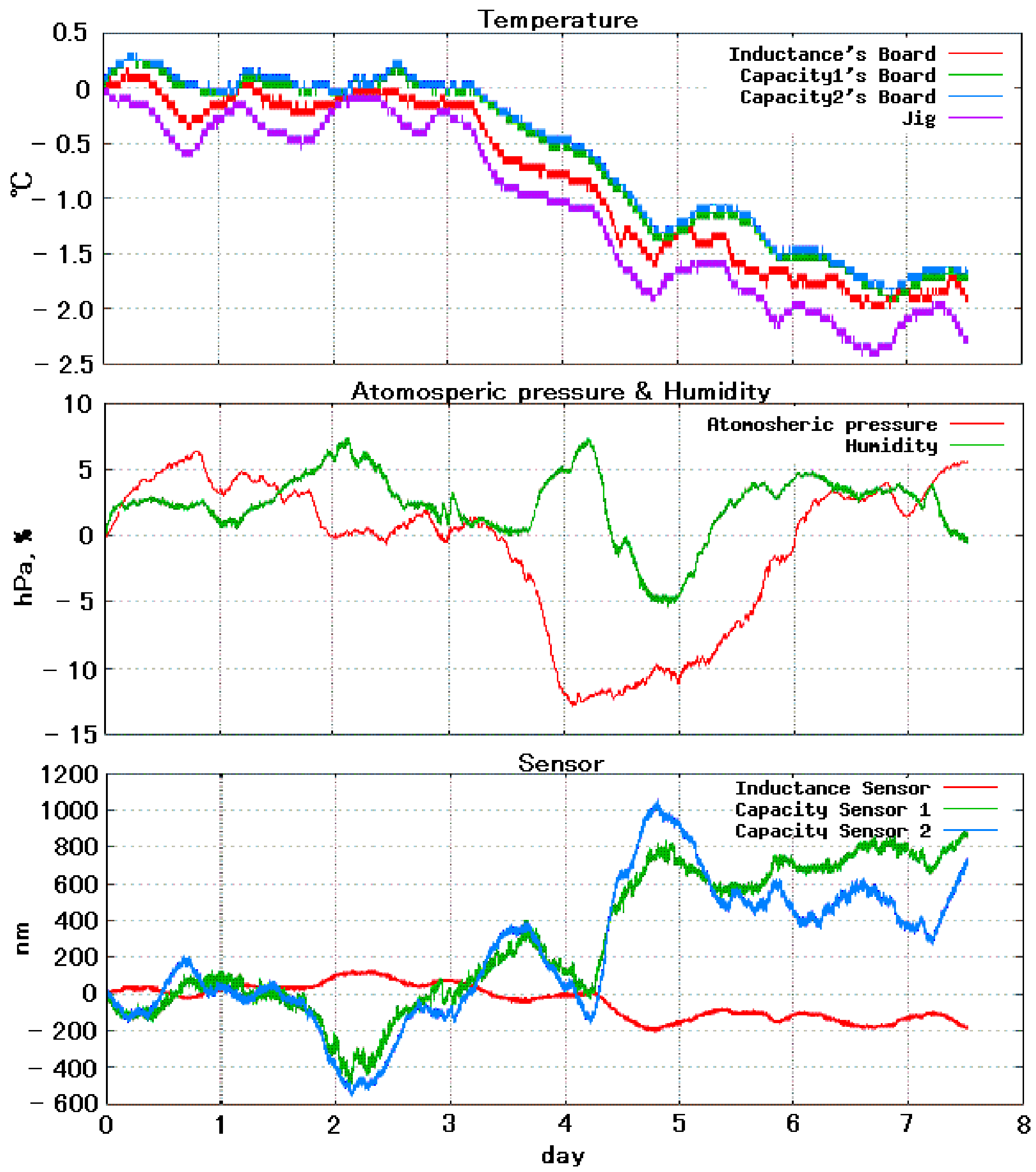


図 3.10　測定結果。　上段赤：インダクタンスセンサーの基板の温度。　上段緑、青：静電容量センサー 1、2 の基板の温度。　上段紫：治具の温度。　中段赤：気圧。　中段緑：湿度。　下段赤：インダクタンスセンサーの測定値。　下段緑、青：静電容量センサー 1、2 の測定値。　いずれの値も測定開始時点の値からの増分を表している。

一番下がセンサーの測定値のグラフである。一見してわかるように、インダクタンスセンサーの安定性は静電容量センサーよりも優れている。それぞれのセンサーの約 1 週間の間に起こった変動の標準偏差 (安定性) を計算し、表 3.1 に表した。

センサー	σ
インダクタンスセンサー	90.4 nm
静電容量センサー 1	376.2 nm
静電容量センサー 2	362.1 nm

表 3.1　各センサーの変動の標準偏差

どのセンサーも 50nm の安定性を持っていない。

この変動を冶具の熱膨張による実際の変動かどうかを考察する。鉄の熱膨張率は 12×10^{-6} [1/℃] であるので、冶具が温度膨張によって相似変形したとすると、図 3.10 のように温度が 2 ℃程度変化した場合、測定を行っている〜300μm の距離は、

$$12 \times 10^{-6}[1/℃] \times 2[℃] \times 300 \times 10^{-6}[m] \simeq 7[nm]$$

と、7nm 程度の変動しか示さないはずである。しかし、表 3.1 の値は 7nm よりもはるかに大きいので、この変動は冶具の熱膨張によるものではないということがわかる。

3.5　環境変数による補正

どちらのセンサーも必要とする 50nm の安定性を満たしていないので、このまま使うことはできない。そこでこの結果を補正することで実用に耐えうる安定性を獲得する方法を考える必要がある。

図 3.10 の中段のグラフと下段のグラフを見比べてみる。すると、インダクタンスセンサー (下段の赤) と湿度 (中段の緑) は正の相関を示していることが見て取れる。一方で静電容量センサー (下段の緑、青) と湿度は負の相関を示していることが見て取れる。(特に $x = 2day, x = 4 - 5day$ のところの変動を見るとわかりやすい。) さらに、気圧 (中段の赤) とインダクタンスセンサー、静電容量センサーは相関が見られない。

次に、図 3.10 の上段のグラフと下段のグラフを見比べてみる。上段のグラフからわかるように、測定を行っていた約 1 週間の間に温度は下がっていく傾向にあることがわかる。インダクタンスセンサーは 1 週間の間に徐々に測定値が小さくなる方へとシフトしていき、静電容量センサーは徐々に測定値が大きくなる方へとシフトしていっていることが見て取れる。つまり、インダクタンスセンサーは温度と正の相関を示し、静電容量センサーは温度と負の相関を示す。

まとめると、

センサー	湿度相関	温度相関	気圧相関
インダクタンスセンサー	正	正	無
静電容量センサー	負	負	無

である。

3.5.1 水蒸気量の計算

湿度とは、その時点での気温における飽和水蒸気量と、水蒸気の分圧の比である。よって、湿度は温度の関数でもあるので、相関を詳しく調べるときに空気中の水蒸気の量と温度が縮退した変数である湿度を、温度と同格に扱うことは望ましくない。そこで、空気中の水蒸気の絶対量、つまり空気中の水分子の数を計算する。

気温 t[℃] での飽和水蒸気圧 P_S[Pa] は [10]、

$$P_S = \exp\left(\frac{1752 + 26.26t - 0.008t^2}{273.15 + t}\right)$$

湿度を h[%] とすると、水蒸気の分圧 p[Pa] は、

$$p = hP_S$$

全圧 (気圧) を P[Pa] とすると、絶対湿度 $H[\mathrm{kg}_{(H_2O)}\ /\ \mathrm{kg}_{(dry\ air)}]$ は [11]、

$$H = \frac{18p}{29(P - p)}$$

乾燥空気の質量 m[kg] は、空気の平均分子量を μ[kg]、気体定数を R、絶対温度を T[K] として、

$$(P - p)V = \frac{m}{\mu}RT \Longrightarrow m = \frac{(P - p)\mu V}{RT}$$

よって、空気中の水分子の質量 ($\propto$ 水分子の数) は、

$$\begin{aligned}
H \times m &= \frac{18p}{29(P - p)} \frac{(P - p)\mu V}{RT} \\
&= \frac{18\mu pV}{29RT} \\
&\propto \frac{p}{T} \\
&= \frac{hP_S}{T} \\
&= \frac{h}{273.15 + t} \exp\left(\frac{1752 + 26.26t - 0.008t^2}{273.15 + t}\right)
\end{aligned}$$

この最後の値を水蒸気量 N と定義する。

$$N \equiv \frac{h}{273.15 + t} \exp\left(\frac{1752 + 26.26t - 0.008t^2}{273.15 + t}\right)$$

N は空気中の単位体積あたりの水分子の数に比例するある量である。

3.5.2 相関係数の計算

測定値と水蒸気量、測定値と温度の相関係数を計算し、その結果を表 3.2 に示す。

インダクタンスセンサーは水蒸気量、冶具温度と強い正の相関を示し、静電容量センサーは水蒸気量、冶具温度と強い負の相関を示すことが数値的にも確かめられた。

センサー	水蒸気量	冶具温度
インダクタンスセンサー	0.899	0.951
静電容量センサー 1	- 0.863	- 0.924
静電容量センサー 2	- 0.971	- 0.840

表 3.2　各センサーの測定値と水蒸気量、冶具温度の相関係数。

3.5.3　水蒸気量と温度による補正

精密位置センサーの測定値が水蒸気量、温度と強い相関関係があることから、その二つを変数としてセンサーの測定値を補正することを考える。また、温度変数は冶具の温度 (すなわちセンサーヘッドの温度) を使えばよいのか、それともコントロールボックス内の基板の温度を使えばよいのかも確かめる必要があるので、両方の温度を試してみる必要がある。

温度変数に冶具温度を用いる場合

まず、図 3.11 のように x 軸に水蒸気量、y 軸に冶具の温度、z 軸にインダクタンスセンサーの測定値をプロットする。すると、インダクタンスセンサーの測定値が水蒸気量と冶具の温度に比例することがわかる (プロットした点がある一つの平面上に載る)。

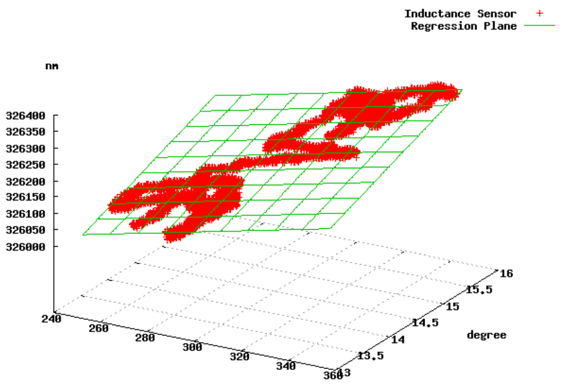


図 3.11　インダクタンスセンサーの測定値の、水蒸気量と冶具温度との関係

同様に、静電容量センサーの 1、2 も同じように 3 次元のグラフにプロットすると、図 3.12、図 3.13 のようにインダクタンスセンサーの場合と同様にプロット点がある平面上に載る。

すなわち、精密位置センサーの測定値 d は、水蒸気量 N と冶具の温度 t、適当な係数 A、B、C を用いて、

$$d = A \times N + B \times t + C$$

という平面上に分布する。そこで最小二乗法を用いて図 3.11、図 3.12、図 3.13 の平面の方程式を求め、それぞれの係数 A、B、C を計算する。そして、精密位置センサーの測定値から水蒸気量 N と冶具の温度 t に関

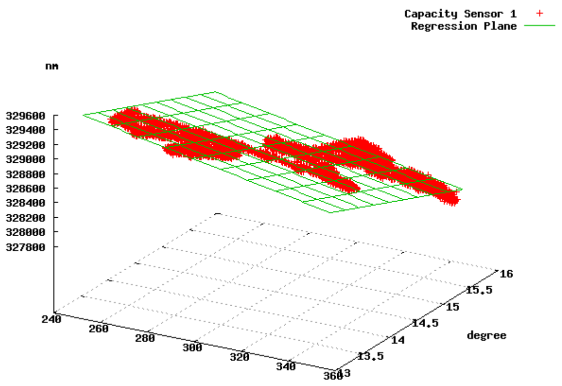


図 3.12　静電容量センサー 1 の測定値の、水蒸気量と冶具温度との関係。

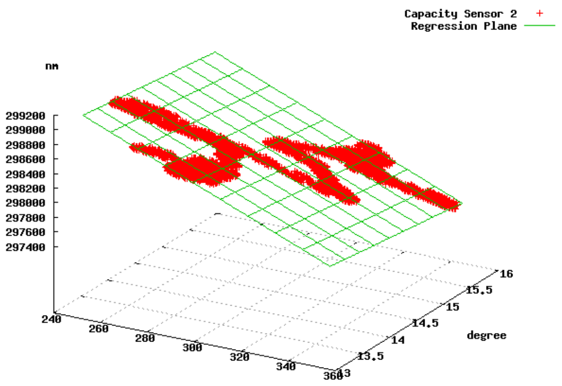


図 3.13　静電容量センサー 2 の測定値の、水蒸気量と冶具温度との関係。

係している項を引いてやれば、水蒸気量と温度に関係の無い部分のみが残るはずである。よって、i 回目の測定における精密位置センサーの測定値を d_i、水蒸気量を N_i、冶具温度を t_i とすると、補正された精密位置センサーの測定値 D_i は、

$$D_i = d_i - A \times N_i - B \times t_i \quad (i = 1 \sim 100000)$$

と表される。

実際に計算した係数を表 3.3 に示す。

センサー	A	B	C
インダクタンスセンサー	1.616	72.649	324639.171
静電容量センサー 1	-6.107	-320.482	335230.166
静電容量センサー 2	-13.009	-96.597	303514.879

表 3.3　各センサーの平面の方程式の係数。温度変数には冶具の温度を使う。

補正する前の測定値のグラフを図 3.14 に、補正した後の測定値のグラフを図 3.15 に示す。

温度変数にコントロールボックス内の基板の温度を用いる場合

温度変数に冶具温度ではなく、コントロールボックス内の基板の温度を用いた場合も、まったく同様に解析を行う。x 軸に水蒸気量、y 軸に基板の温度、z 軸に精密位置センサーの測定値をプロットすると、冶具の温度を用いてプロットしたときのように、プロットした点は平面上に載る。また、その平面の方程式を最小二乗法で計算した結果、得られた係数を表 3.4 に示す。

また、補正する前の測定値のグラフを図 3.16 に、補正した後の測定値のグラフを図 3.17 に示す。

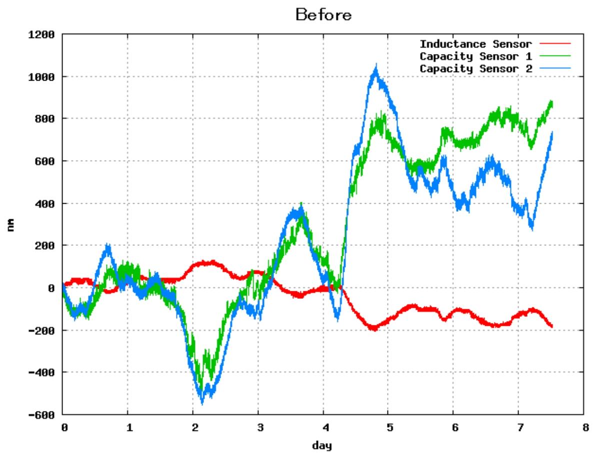


図 3.14　補正する前の精密位置センサーの測定値。　赤：インダクタンスセンサー　緑、青：静電容量センサー 1、2

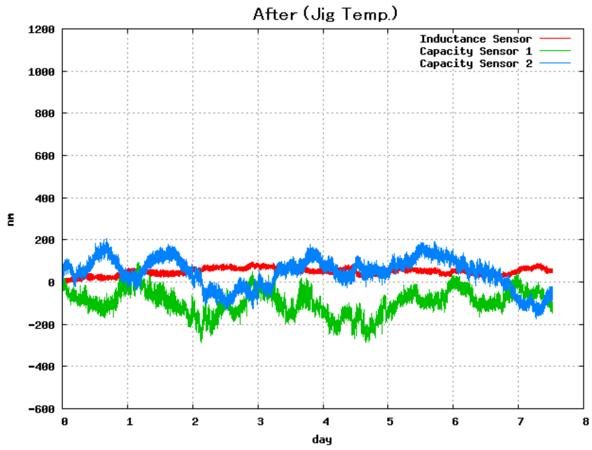


図 3.15　水蒸気量と冶具温度で補正した後の精密位置センサーの測定値。　赤：インダクタンスセンサー　緑、青：静電容量センサー 1、2

センサー	A	B	C
インダクタンスセンサー	1.834	71.558	324201.245
静電容量センサー 1	-6.699	-330.435	337348.960
静電容量センサー 2	-13.434	-89.742	304028.735

表 3.4　各センサーの平面の方程式の係数。温度変数には基板の温度を使う。

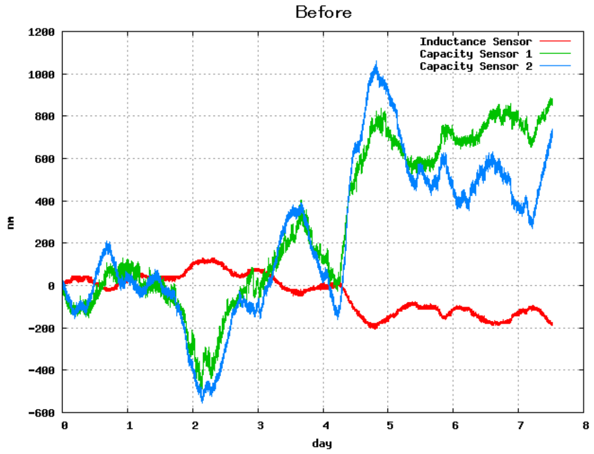


図 3.16　補正する前の精密位置センサーの測定値。　赤：インダクタンスセンサー　緑、青：静電容量センサー 1、2

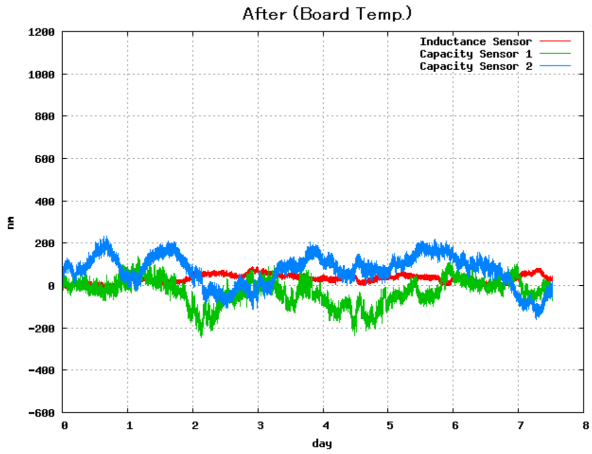


図 3.17　水蒸気量と基板温度で補正した後の精密位置センサーの測定値。　赤：インダクタンスセンサー　緑、青：静電容量センサー 1、2

3.5.4 補正後の安定性

図 3.15 と図 3.17 はどちらも補正前に比べて大幅に安定性が改善されているが、どちらが優れているかということは一見しただけではわからない。そこで、それぞれの場合の測定値の振れの標準偏差を計算して表 3.5 に示す。

センサー	補正前	補正後 (治具温度)	補正後 (基板温度)
インダクタンスセンサー	90.4 nm/week	16.4 nm/week	19.8 nm/week
静電容量センサー 1	376.2 nm/week	60.0 nm/week	61.7 nm/week
静電容量センサー 2	362.1 nm/week	71.8 nm/week	74.8 nm/week

表 3.5　各センサーの変動の補正前、補正後の標準偏差。

補正を行うことで、標準偏差が約 $\frac{1}{5}$ に減少している。また、温度変数の違いによる安定性の違いは、ごくわずかに治具温度 (すなわちセンサーヘッドの温度) を使ったほうが良さそうである。(もっとも、2 つの差はわずかであるので、より詳しい解析が必要である。)

さらに重要なポイントは、静電容量センサーは補正しても > 50 nm/week であるが、インダクタンスセンサーを補正してやれば、必要とされる < 50 nm/week を達成できるということである。

3.6 その他のデータセット

先ほどの解析は 2005 年 11 月 30 日〜2005 年 12 月 7 日に取得したデータセットである。他の日時にも同じように約 1 週間データを取得した。(付録参照) それらを解析した結果を示す。また、11 月 30 日〜のデータセットの解析結果も再掲する。

それぞれのデータセットの回帰平面の係数 A、B、C を表 3.6 に示す。

同じデータセットでは温度変数に治具温度を使うか基板温度を使うかで、係数はオーダーは同じだがファクターで変わってくることがある。。また、測定原理が同じ静電容量センサーどうしでも、係数がセンサーヘッドによって大きく違うことがある。そのため、(少なくとも静電容量センサーの) センサーヘッドには個性があり、センサーヘッドごとに係数を計算しなければならないと思われる。

また、同じセンサーでもデータセットが違うと係数が係数が大きく変わってくる。そのため、一度係数を計算したら以降はその値がずっと使えるということは無く、適当な期間が経過したら新たに係数を計算しなおす必要があると考えられる。

次に、それぞれのデータセットで行った補正で、どの程度補正ができたかを見るために、補正前の各精密位置センサーの測定値の変動の標準偏差と、補正後の標準偏差を表 3.7 に示す。

補正を行うことによって、変動の標準偏差を $\frac{1}{3}$〜$\frac{1}{15}$ 程度に抑えることが可能である。また、静電容量センサーは補正しても >50 nm/week の安定性が保てないことがあるが、インダクタンスセンサーでは補正すれば <50 nm/week の安定性が可能である。よって、**新技術望遠鏡では分割主鏡制御システム用の精密位置センサーとしてシグマ光機社製のインダクタンスセンサーを採用することに決定した。**

データ取得開始日	温度変数 センサー	冶具温度を使用 A	 B	 C	基板温度を使用 A	 B	 C
2005/11/30〜	インダクタンス	1.6	72.6	324639	1.8	71.6	324201
	静電容量 1	-6.1	-320.5	335230	-6.7	-330.4	337349
	静電容量 2	-13.0	-96.6	303515	-13.4	-89.7	304029
2005/12/26〜	インダクタンス	1.2	38.8	325040	1.0	32.6	325002
	静電容量 1	-2.2	-266.8	333396	-0.9	-227.0	333691
	静電容量 2	-10.4	-154.3	303209	-8.6	-175.2	303858
2006/1/13〜	インダクタンス	0.3	147.3	323872	0.1	125.6	323549
	静電容量 1	-3.2	-482.1	335927	-2.6	-408.8	336949
	静電容量 2	-13.2	-639.5	309252	-12.2	-584.6	311266
2006/1/23〜	インダクタンス	2.5	96.1	324099	2.2	35.2	324660
	静電容量 1	-7.7	-194.5	333540	-7.2	-66.7	332381
	静電容量 2	-16.2	-515.3	308042	-13.1	-210.0	305152
2006/2/1〜	インダクタンス	3.8	-46.4	328868	4.2	-73.8	326595
	静電容量 1	-3.4	-440.8	335199	-6.4	-310.7	336544
	静電容量 2	-14.7	-295.7	305063	-17.1	-183.0	305603

表 3.6　各データセットの各センサーの平面の方程式の係数。ただし、A、B は小数点以下第 2 位を四捨五入し、C は小数点以下第 1 位を四捨五入した。

データ取得開始日	センサー	補正前	補正後 (冶具温度)	補正後 (基板温度)
2005/11/30〜	インダクタンス	90.4 nm/week	16.4 nm/week	19.8 nm/week
	静電容量 1	376.2 nm/week	60.0 nm/week	61.7 nm/week
	静電容量 2	362.1 nm/week	71.8 nm/week	74.8 nm/week
2005/12/26〜	インダクタンス	17.6 nm/week	6.6 nm/week	6.3 nm/week
	静電容量 1	68.5 nm/week	27.2 nm/week	22.5 nm/week
	静電容量 2	120.4 nm/week	45.1 nm/week	40.4 nm/week
2006/1/13〜	インダクタンス	41.8 nm/week	10.0 nm/week	15.7 nm/week
	静電容量 1	135.9 nm/week	32.8 nm/week	51.7 nm/week
	静電容量 2	337.9 nm/week	60.1 nm/week	70.7 nm/week
2006/1/23〜	インダクタンス	307.9 nm/week	43.9 nm/week	44.1 nm/week
	静電容量 1	157.2 nm/week	74.1 nm/week	76.4 nm/week
	静電容量 2	354.9 nm/week	157.9 nm/week	147.6 nm/week
2006/2/1〜	インダクタンス	726.3 nm/week	49.9 nm/week	43.8 nm/week
	静電容量 1	304.8 nm/week	28.0 nm/week	46.7 nm/week
	静電容量 2	492.2 nm/week	47.6 nm/week	64.8 nm/week

表 3.7　各データセット、各センサーの補正前と補正後のセンサーの変動の標準偏差。ただし、小数点第 2 位を四捨五入している。

第 4 章

インダクタンスセンサーの問題点

前回までの実験から、新技術望遠鏡の分割主鏡制御システム用の精密位置センサーとしてインダクタンスセンサーを採用することに決定した。そこで、より詳細な特性等を調べるため、前回までは 1 個だったインダクタンスセンサーを 4 個に増やして試験を行った。測定方法は前回までと同じで、インダクタンスセンサーを治具に固定して、動かない状態にして対向金属面までの距離を測定した。また、同時に冶具の温度、すなわちセンサーヘッドの温度と、インダクタンスセンサーのコントロールボックス内の基板の温度、湿度、気圧を測定した。

その結果、インダクタンスセンサーの問題点が発見された。

4.1 測定値のジャンプ

測定途中で、温度、湿度などの環境に特に変動が起きていないにも関わらず、インダクタンスセンサーの測定値が数十 nm〜数 μm ジャンプすることがある。その様子を図 4.1、図 4.2 に示す。

当然冶具は動かしていないのでこのような変動が実際に起きたとは考えにくい。このようなジャンプが発生すると、

- 分割鏡セグメントが動いていないにも関わらず、動いたと誤認する。
- 最小二乗法で補正のための係数を計算するときに、精度が著しく悪化する。

といった問題が発生する。

また、このようなジャンプは、

- 4 つのインダクタンスセンサーで同時に起きる。
- ジャンプが起こった後、測定値は元の値に戻らない。
- ジャンプの大きさ、向き (正か負か) はジャンプごと/センサーごとに決まる。

という特徴を持つ。

このようなジャンプはソフト的に消去することは可能である。しかしそのようなソフト面でのジャンプ対策では、実際に分割鏡セグメントに取り付けて運用する際に問題が生じる。なぜなら、セグメントをアクチュエーターで実際に動かしたときも距離の測定値はジャンプしたような変動を示すと考えられが、そのときにその変動と異常なジャンプを判別するのは難しい。また、そのような実際の変動も消去してしまい、制御に困難を来たすおそれもある。そのためソフト面の対処ではなく、根本的な対処が求められる。

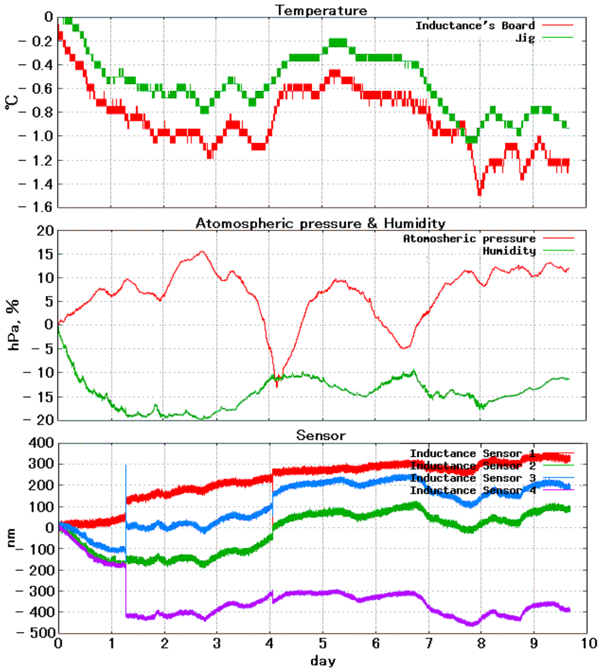


図 4.1　2006 年 3 月 12 日〜の測定結果。　上段赤：インダクタンスセンサーの基板の温度。　上段緑：治具の温度。　中段赤：気圧。　中段緑：湿度。　下段赤〜紫：インダクタンスセンサーの測定値。　いずれの値も測定開始時点の値からの増分を表している。2 日目前半と 5 日目始めに環境に変動が無いにも関わらず、測定値が数十〜数百 nm ジャンプしている。

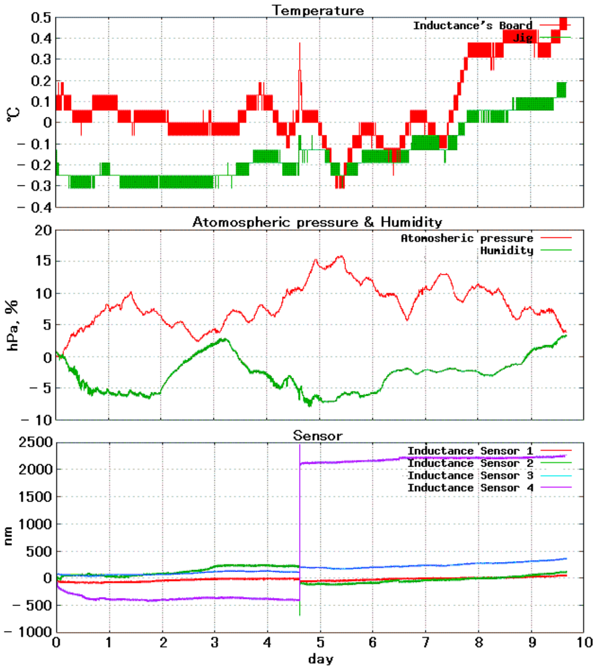


図 4.2　2006 年 4 月 20 日〜の測定結果。　上段赤：インダクタンスセンサーの基板の温度。　上段緑：治具の温度。　中段赤：気圧。　中段緑：湿度。　下段赤〜紫：インダクタンスセンサーの測定値。　いずれの値も測定開始時点の値からの増分を表している。5 日目後半に環境に変動が無いにも関わらず、測定値が数百 nm〜数 μm ジャンプしている。

4.1.1　測定値のジャンプの原因の特定

ジャンプの原因を特定するために、測定中に

1. GND を手で触れる。
2. センサーヘッドとコントロールボックスをつなぐケーブルを曲げる。
3. 測定場所付近の床に振動を与える。
4. センサーヘッドに息を吹きかける。

というような刺激を与える実験を行った。

1. に関しては、GND の電位、すなわち対向金属面の電位が変化することによって測定値のジャンプが発生するのではないかと考えたためである。2. に関しては、ケーブルを曲げることによって、センサーヘッドやコントロールボックスに接続されている部分の接触抵抗などが変化し、それが測定値のジャンプにつながるのではないかと考えたからである。3. に関しては、センサーヘッドは治具にねじ込んで固定してあるが、振動によってその固定がずれて実際の距離が変わり、測定値のジャンプとなるのではないかと考えてからである。近くで飛び跳ねることで、床に振動を与えた。4. に関しては、息を吹きかけることで温度と湿度 (水蒸気量) を

急変させるための作業である。測定値のジャンプは環境変化によるものではなさそうだが、それによるインダクタンスセンサーの挙動と他の刺激による挙動との比較のために行った。

その結果を図 4.3〜図 4.6 に示す。

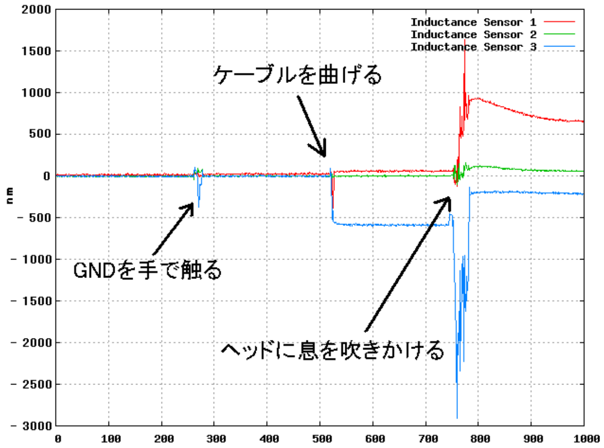


図 4.3　GND をさわる、ケーブルを曲げる、センサーヘッドに息を吹きかける、という刺激を与えたときのインダクタンスセンサーの挙動。グラフの横軸は約 20 分

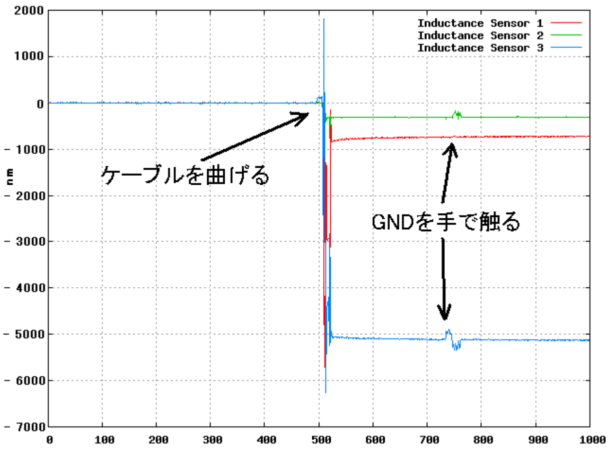


図 4.4　ケーブルを曲げる、GND をさわる、という刺激を与えたときのインダクタンスセンサーの挙動。

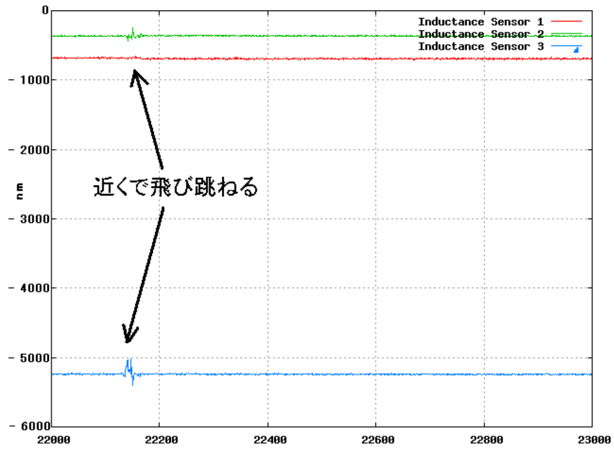


図 4.5　床に振動を与える、という刺激を与えたときのインダクタンスセンサーの挙動。

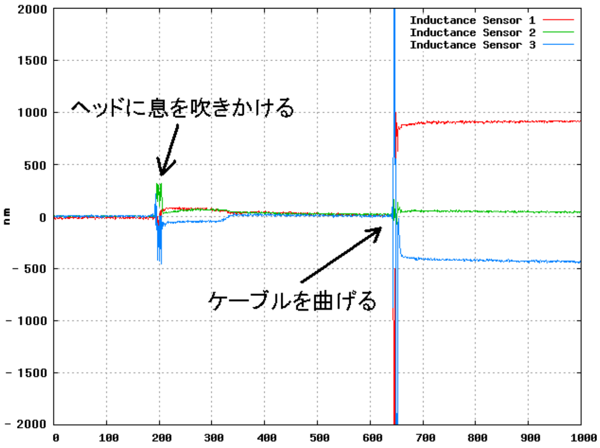


図 4.6　センサーヘッドに息を吹きかける、ケーブルを曲げる、という刺激を与えたときのインダクタンスセンサーの挙動。

以上の結果より、GND をさわる、床に衝撃を与える、という刺激は、一時的なノイズの原因とはなるが、測定値のジャンプの原因とはならないことがわかる。また、センサーヘッドに息を吹きかけて温度と湿度を急変させたときは、図 4.6 のようにしばらくの間測定値に変化が見られるが、徐々に元の値に戻ることがわかる。(図 4.3 では、息を吹きかけた後に測定値が元の値に戻っていないが、測定値のその後の変化を見てみると徐々に元の値に近づいていく様子が見られるので、このまましばらく経つと元の値に戻ることが期待される。)

一方で、ケーブルを曲げた場合は測定値にジャンプが発生していることがわかる。このためジャンプの原因はケーブルが曲がることと考えられる。そのため、ジャンプの対策としては、ケーブルをトラス等に固定するということが考えられる。

4.2　環境応答特性の反転

インダクタンスセンサーは第 3 章で示したように、水蒸気量、温度に対して正の相関を示す。ところが、まれにこの相関の正負が逆転してしまう現象が観測される。その様子を図 4.7 に示す。

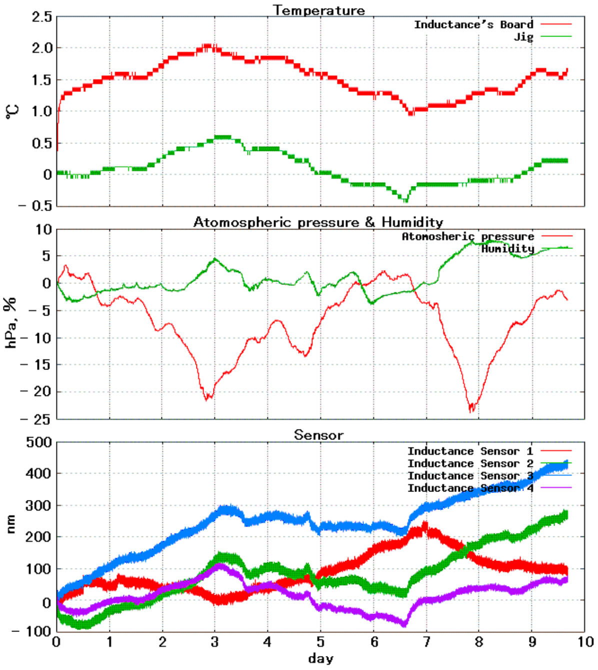


図 4.7　2006 年 3 月 25 日〜の測定結果。　上段赤：インダクタンスセンサーの基板の温度。　上段緑：治具の温度。　中段赤：気圧。　中段緑：湿度。　下段赤〜紫：インダクタンスセンサーの測定値。　いずれの値も測定開始時点の値からの増分を表している。

この図からわかるように、下段の赤で示されたインダクタンスセンサーの 1 番は、他の 3 つとは逆方向に測定値が変動している。

この逆転現象の原因がセンサーヘッド側にあるのか、それともコントロールボックス側にあるのかを特定するために、次のような実験を行った。まず環境応答が逆転したセンサーヘッド (1 番、図 4.7 の赤) と逆転していないセンサーヘッド (2 番、図 4.7 の緑) のコントロールボックスの接続口を交換する。もし、センサーヘッド側に逆転の原因があるならば 1 番のセンサーが逆転を示し、コントロールボックス側に原因があるならば 2 番のセンサーが逆転を示すはずである。その結果を図 4.8 に示す。

この図からわかるように、下段の赤で示されたセンサー (1 番) がやはり環境応答の特性が逆転している。よって、逆転の原因はセンサーヘッド側にあると言うことができる。

その他のデータセットを詳しく調べたところ、この他にも環境応答の特性が逆転しているデータセットが見つかった。それをまとめると図 4.9 のようになる。

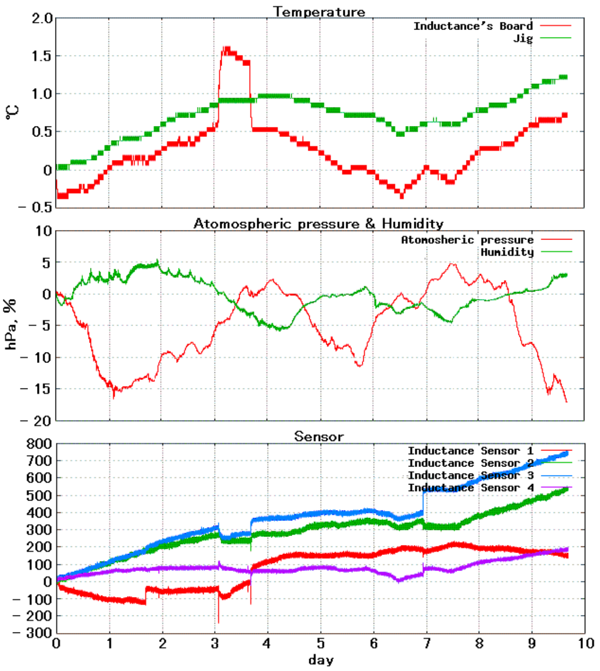


図 4.8　2006 年 4 月 10 日〜の測定結果。　上段赤：インダクタンスセンサーの基板の温度。　上段緑：治具の温度。　中段赤：気圧。　中段緑：湿度。　下段赤〜紫：インダクタンスセンサーの測定値。　いずれの値も測定開始時点の値からの増分を表している。4 日目の変動はコントロールボックスを人為的に温めたもので、今回の実験には関係が無い。

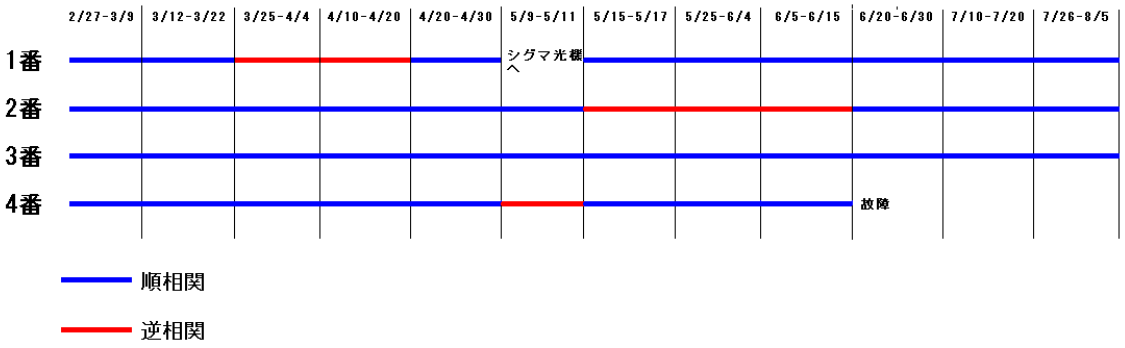


図 4.9　環境応答特性の逆転の様子。1 番〜4 番は 4 つあるセンサーヘッドに振られた番号。図 4.7 などの下段赤 →1 番、下段緑 →2 番、下段青 →3 番、下段紫 →4 番、と対応する。水蒸気量・温度と正の相関 (順相関) の場合は青で、負の相関 (逆相関) の場合は赤で示した。

逆転の特徴は、

- 逆転はセンサーヘッドごとに発生する。
- 逆転の持続時間は 10 日〜1 ヶ月。
- 測定を行っている最中に逆転する現象は観測されなかった。

最後に挙げた特徴から、逆転は測定を開始すること、もしくは測定を終了することが原因で発生するのではないかと疑われる。そこで、従来のように約 10 日間連続して測定するのではなく、約 10 日間を 100 回に分割して測定を行ってみた (測定データは図 4.10、ノイズが発生したので次の節で扱う。図 4.10 では緑で表されたセンサーが逆転を示しているが、これは以前から発生していたものである。)。逆転が測定の開始/終了が原因で起こっているのならば、100 回のうち何回かは特性が逆転したデータが取得できると期待される。

しかし、実際に取得したデータに逆転が発生したものは見られなかった。この結果からは上記の仮説は間違っているとは断定できないものの、少なくとも上記の仮説に対しては否定的な結果である。

結局は、環境応答の特性の逆転の原因は不明のままである。

4.3 ノイズの発生

測定中にノイズが発生することがあった。その様子を図 4.10、図 4.11 に示す。

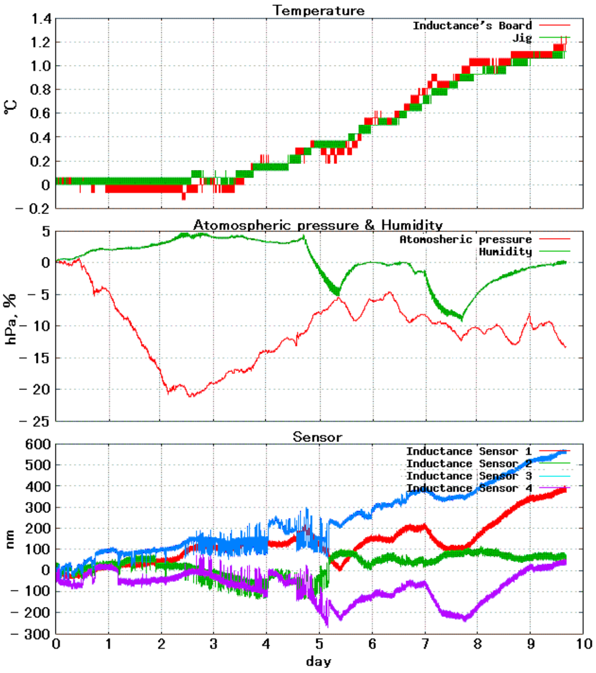


図 4.10　2006 年 5 月 25 日〜の測定結果。　上段赤：インダクタンスセンサーの基板の温度。　上段緑：治具の温度。　中段赤：気圧。　中段緑：湿度。　下段赤〜紫：インダクタンスセンサーの測定値。　いずれの値も測定開始時点の値からの増分を表している。6 日目までノイズが発生している。

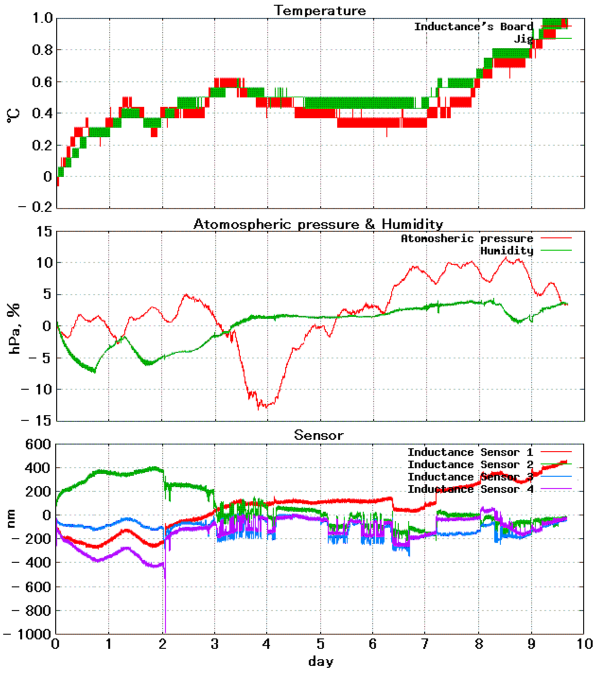


図 4.11　2006 年 6 月 5 日〜の測定結果。　上段赤：インダクタンスセンサーの基板の温度。　上段緑：治具の温度。　中段赤：気圧。　中段緑：湿度。　下段赤〜紫：インダクタンスセンサーの測定値。　いずれの値も測定開始時点の値からの増分を表している。3 日目以降にノイズが発生している。

このノイズを拡大してみると、2 種類のタイプに分けられることがわかったので、それぞれのタイプのノイズの拡大図を以下に図示する。

まず、比較のために静穏時の測定値の様子を図 4.12 に示す。

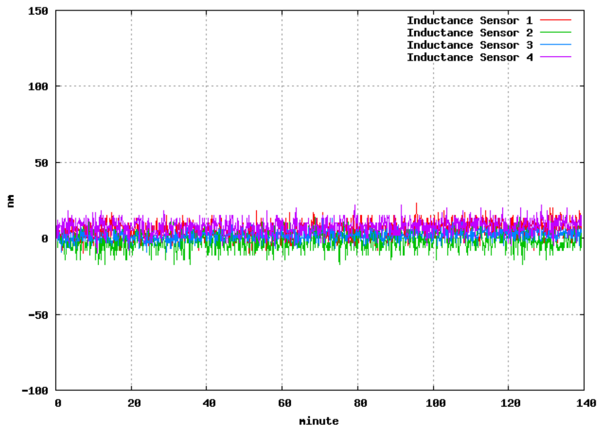


図 4.12　2006 年 5 月 25 日～の測定結果の拡大図。静穏な状態の測定値の変動の様子。ホワイトノイズのみが見られる。

次に、一つ目のタイプ (タイプ 1) のノイズの拡大図を図 4.13、図 4.14 に示す。

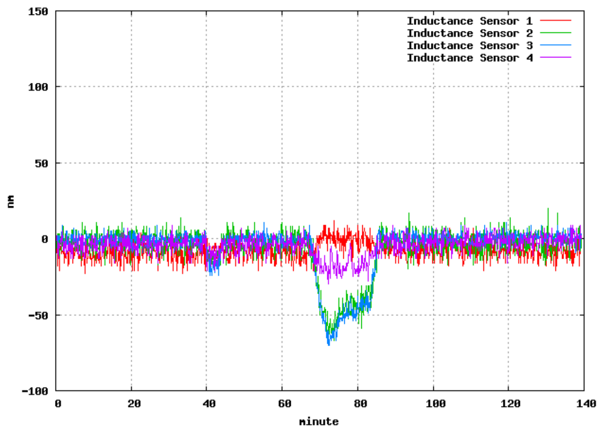


図 4.13　2006 年 5 月 25 日～の測定結果の拡大図。タイプ 1 のノイズが見られる。

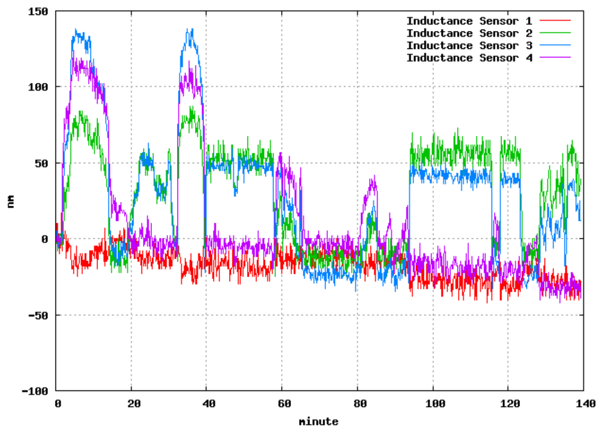


図 4.14　2006 年 5 月 25 日～の測定結果の拡大図。タイプ 1 のノイズが見られる。

続いてタイプ 2 のノイズを図 4.15 、図 4.16 に示す。

タイプ 1 のノイズの特徴は、

1. 温度、湿度がほぼ一定でも発生する 。
2. タイムスケールは ～10 分。
3. 変動のスケールは ～50nm 。
4. 変動が終わったらほぼ元の値に戻る。

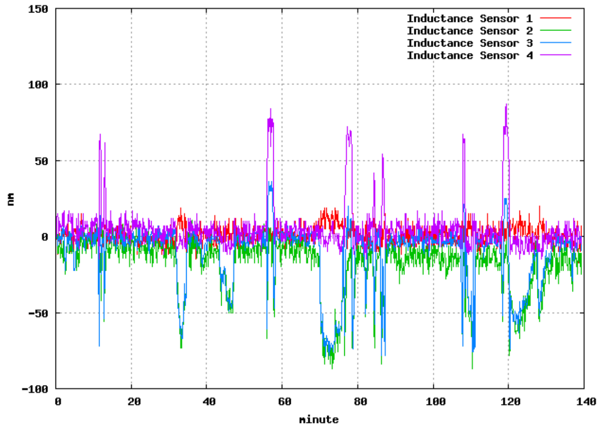


図 4.15　2006 年 5 月 25 日〜の測定結果の拡大図。タイプ 2 のノイズが見られる。パルス状のノイズがタイプ 2 のノイズ。

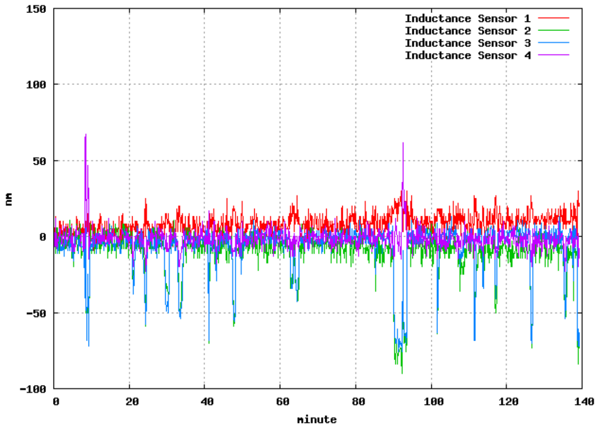


図 4.16　2006 年 5 月 25 日〜の測定結果の拡大図。タイプ 2 のノイズが見られる。パルス状のノイズがタイプ 2 のノイズ。

5. センサー 2、3、4(緑、青、紫) が同じ特性を示し、1(赤) が逆の特性を示す。

タイプ 2 のノイズの特徴は、

1. 温度、湿度がほぼ一定でも発生する 。
2. タイムスケールは <1 分。
3. 変動のスケールは 〜50nm 。
4. 変動が終わったらほぼ元の値に戻る。
5. センサー 2、3(緑、青) が同じ特性を示し、4(紫) は 2、3 と同じだったり逆だったりする
6. センサー 1(赤) はこのタイプの変動がほとんど見られない

2 つのタイプの違いは、ノイズのタイムスケールと、センサーごとの特性である。

このノイズの原因として、電源電圧にノイズが乗ったため、または GND 電位にノイズが乗ったため、というものが考えられる。これを確かめるために測定中に

1. 電源ケーブルでループを作り、そこで電動ドリルを回してノイズを乗せる。
2. GND 線でループを作り、そこで電動ドリルを回してノイズを乗せる。
3. 比較のため電源ケーブルと GND 線から離れたところで電動ドリルを回す。

という実験を行った。その結果を図 4.17 に示す。

図 4.17 よりわかるように、人為的なノイズとは無関係に測定値のノイズが発生している時間帯もあるが、その時間帯以外でも人為的にノイズを発生させたところで測定値にもノイズが発生している。また、電源電圧、GND 電位のどちらにノイズを与えた場合にも測定値のノイズは発生しているようである。

この結果からは、測定値のノイズの原因が電源電圧・GND 電位に乗ったノイズである可能性があることを示している。しかし一方で、電源電圧・GND 電位に乗ったノイズの発生原因は何か、またこれまでのデータセットにこのような電源電圧・GND 電位に乗るノイズが発生しなかったのはなぜか、ということは不明なままである。

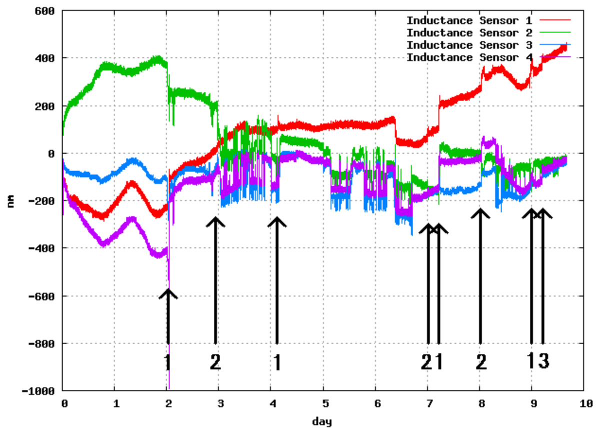


図 4.17　2006 年 6 月 5 日〜の測定結果。図中の↑の箇所で人為的なノイズを発生させた。↑の下の番号は、1:電源ケーブルの近くで電動ドリルを回してノイズを乗せる、　2:GND 線の近くで電動ドリルを回してノイズを乗せる、　3:電源ケーブルと GND 線から離れたところで電動ドリルを回す　という作業を表している。ドリルを回していた時間は数秒〜1 時間程度。

このデータセットを取得した後にこのようなノイズは発生しなくなった。2006 年 5 月後半から 6 月前半にかけての 1 ヶ月程度の期間のみノイズが発生したことになるので、この期間に京都大学構内で行われた工事、または他の校舎で行われた何らかの実験が影響を与えていたのではないかとも考えられる。

以後、電源電圧にノイズが乗ることを防ぐために、電源ケーブルにフェライトコアを装着しておいた。

第 5 章

補正の有効性と、さらに長期の安定性

5.1　〜1 週間の安定性

4 つのインダクタンスセンサーを使った測定から複数のデータセットが得られた。まずはそれらのデータセットのインダクタンスセンサーの〜1 週間の測定値の補正前の変動の標準偏差と、補正後の変動の標準偏差を表 5.1、表 5.2 に表示する。

ただし、これらのデータセットの中には 4.1 節で示したような測定値のジャンプが含まれているものもある。測定値のジャンプが発生していると、補正係数を最小二乗法で求める際に著しく精度が悪化してしまう。そこで、測定値のジャンプが発生している場合は、ジャンプをソフト的に消去した後に、補正係数の計算を行った。

5.1.1　補正の有効性

以上 49 例の場合について測定とその補正を行った。このうち〜1 週間の安定性が、冶具温度と基板温度を用いた補正のうちどちらかが < 50 nm/week となった場合と、どちらの温度変数を用いても > 50 nm/week となった場合に分けると、

< 50 nm/week となった場合：36 例

> 50 nm/week となった場合：13 例

であった。

また、> 50 nm/week となった場合 13 例のうち 6 例は、4.3 節で示したようなノイズが発生した場合のものである (5/25〜と 6/5〜のデータの 2 番、3 番、4 番のセンサー)。さらに 1 例は 4.1 節で示したような測定値のジャンプが発生し、しかもジャンプがソフト的に完全に消去することができなかった場合のものである (6/20〜のデータの 2 番のセンサー)。よって、とくに問題が無いにも関わらず > 50 nm/week となった場合は残り 6 例であるが、そのうち 3 例では < 60 nm/week まで補正されている。

よって、ノイズや測定値のジャンプなどの問題が発生していない 42 例のうち、この補正方法が有効ではないと考えられるケースは 3 例のみである。また、その 3 例はすべて 4/10〜のデータなので、補正方法の問題というよりはその期間だけ何らかの異常な現象が起こったのではないかとも考えられる (4/10〜の測定では、コントロールボックスの温度を使い捨てカイロで上げるという人為的な変化を起こしている。)。そのため、この補正方法の有効性は高いと言うことができる。

データ取得開始日	センサー	補正前	補正後 (治具温度)	補正後 (基板温度)
2005/11/30〜	インダクタンス	90.4 nm/week	16.4 nm/week	19.8 nm/week
2005/12/26〜	インダクタンス	17.6 nm/week	6.6 nm/week	6.3 nm/week
2006/1/13〜	インダクタンス	41.8 nm/week	10.0 nm/week	15.7 nm/week
2006/1/23〜	インダクタンス	307.9 nm/week	43.9 nm/week	44.1 nm/week
2006/2/1〜	インダクタンス	726.3 nm/week	49.9 nm/week	43.8 nm/week
2006/2/27〜	インダクタンス 1	40.1 nm/week	20.2 nm/week	20.1 nm/week
	インダクタンス 2	121.6 nm/week	48.9 nm/week	48.3 nm/week
	インダクタンス 3	86.3 nm/week	32.3 nm/week	33.0 nm/week
	インダクタンス 4	61.9 nm/week	13.5 nm/week	15.1 nm/week
2006/3/12〜	インダクタンス 1	62.9 nm/week	49.9 nm/week	48.3 nm/week
	インダクタンス 2	70.6 nm/week	45.6 nm/week	44.8 nm/week
	インダクタンス 3	58.7 nm/week	39.2 nm/week	38.2 nm/week
	インダクタンス 4	58.3 nm/week	27.6 nm/week	28.5 nm/week
2006/3/25〜	インダクタンス 1	60.5 nm/week	34.0 nm/week	37.2 nm/week
	インダクタンス 2	86.4 nm/week	40.0 nm/week	40.5 nm/week
	インダクタンス 3	94.9 nm/week	56.2 nm/week	57.7 nm/week
	インダクタンス 4	41.6 nm/week	10.5 nm/week	16.5 nm/week
2006/4/10〜	インダクタンス 1	117.6 nm/week	70.1 nm/week	113.6 nm/week
	インダクタンス 2	117.2 nm/week	83.0 nm/week	104.9 nm/week
	インダクタンス 3	129.5 nm/week	73.1 nm/week	123.6 nm/week
	インダクタンス 4	58.5 nm/week	38.3 nm/week	57.2 nm/week
2006/4/20〜	インダクタンス 1	115.2 nm/week	59.2 nm/week	93.9 nm/week
	インダクタンス 2	53.5 nm/week	27.9 nm/week	44.9 nm/week
	インダクタンス 3	100.2 nm/week	45.7 nm/week	84.1 nm/week
	インダクタンス 4	51.7 nm/week	39.7 nm/week	40.9 nm/week

表 5.1　各データセット、各センサーの補正前と補正後のセンサーの変動の標準偏差。ただし、小数点第 2 位を四捨五入している。

5.2　$>$1 週間の安定性

表 5.1、表 5.2 で示した値は、すべて個々のデータセットごとに補正係数を求めて補正を行っている。そのため、表 5.1、表 5.2 の数値で示される安定性は、約 1 週間の期間にわたっての安定性である。そこで、1 週間よりも長い期間にわたっての安定性を調べた。その方法は次のようなものである。まず複数のデータセットから 1 組の補正係数を計算する。その係数を計算に用いた全てのデータセットに適用して補正を行う。そして補正後の安定性を調べる。

ただし、データセットの中には測定値のジャンプが発生しているものもあり、またあるデータセットの測定と次のデータセットの測定との間に何らかの作業によってケーブルが曲がり、測定が行われていない間に

データ取得開始日	センサー	補正前	補正後 (治具温度)	補正後 (基板温度)
2006/5/25〜	インダクタンス 1	99.1 nm/week	21.3 nm/week	23.1 nm/week
	インダクタンス 2	132.0 nm/week	116.6 nm/week	117.3 nm/week
	インダクタンス 3	114.9 nm/week	87.4 nm/week	89.1 nm/week
	インダクタンス 4	280.2 nm/week	183.6 nm/week	183.3 nm/week
2006/6/5〜	インダクタンス 1	153.4 nm/week	44.0 nm/week	41.8 nm/week
	インダクタンス 2	158.2 nm/week	88.3 nm/week	88.4 nm/week
	インダクタンス 3	395.4 nm/week	205.6 nm/week	207.2 nm/week
	インダクタンス 4	225.4 nm/week	125.7 nm/week	129.4 nm/week
2006/6/20〜	インダクタンス 1	123.9 nm/week	36.1 nm/week	41.0 nm/week
	インダクタンス 2	220.9 nm/week	146.0 nm/week	166.7 nm/week
	インダクタンス 3	106.1 nm/week	27.1 nm/week	26.9 nm/week
2006/7/10〜	インダクタンス 1	88.8 nm/week	24.2 nm/week	20.9 nm/week
	インダクタンス 2	183.2 nm/week	51.2 nm/week	39.3 nm/week
	インダクタンス 3	73.1 nm/week	9.5 nm/week	9.4 nm/week
2006/7/26〜	インダクタンス 1	80.7 nm/week	50.6 nm/week	51.9 nm/week
	インダクタンス 2	112.7 nm/week	27.8 nm/week	28.9 nm/week
2006/8/9〜	インダクタンス 1	48.2 nm/week	27.1 nm/week	30.8 nm/week
	インダクタンス 2	113.8 nm/week	17.9 nm/week	22.1 nm/week
2006/8/21〜	インダクタンス 1	27.1 nm/week	8.4 nm/week	8.5 nm/week
	インダクタンス 2	48.0 nm/week	30.0 nm/week	23.6 nm/week
2006/8/31〜	インダクタンス 1	28.4 nm/week	8.0 nm/week	8.0 nm/week
	インダクタンス 2	48.0 nm/week	14.3 nm/week	15.5 nm/week
2006/9/15〜	インダクタンス 1	53.0 nm/week	10.4 nm/week	11.2 nm/week
	インダクタンス 2	57.4 nm/week	9.5 nm/week	9.6 nm/week

表 5.2　各データセット、各センサーの補正前と補正後のセンサーの変動の標準偏差。ただし、小数点第 2 位を四捨五入している。6 月 20 日以降のデータではインダクタンスセンサーの 4 番が故障し、7 月 26 日以降のデータではインダクタンスセンサーの 3 番が故障した。

ジャンプが発生している可能性もある。(その場合は、次のデータセットの全ての測定値にあるオフセット値が乗っていることになる。)

そこで、補正係数の計算にあたっては、次のような方法で行った。まずジャンプをソフト的に消去する。次に、ジャンプが消去された複数のデータセットそれぞれに適当なオフセット値を加えてやる。オフセット値を加えた後の複数のデータセットから補正係数を計算する。その補正係数で補正を行い、補正後の標準偏差を求める。その後標準偏差が小さくなるようにオフセット値を調節し、標準偏差が最小になった時点で作業を終える。最小になった標準偏差が、使用したデータセットを取得した期間にわたっての安定性と考えられる。

結果は 2006 年 2 月 27 日〜、3 月 12 日〜、3 月 25 日〜の 3 つのデータセットを用いて約 6 週間の安定性を計算したものと、2 月 27 日〜、3 月 12 日〜、3 月 25 日〜、4 月 10 日〜、7 月 10 日〜の 5 つのデータセットを用いて約 5 ヶ月間の安定性を計算したものの 2 種類を表 5.3 に示す。また、補正の際の温度変数にはコン

トロールボックスの基板の温度を用いた。(冶具の温度を用いた場合とは、結果が数 nm 程度ずれると思われるが、表 5.1、表 5.2 の値のように大きな違いは無いと考えられる。)

センサー	6 週間の安定性	5 ヶ月の安定性
インダクタンスセンサー 1	43.0 nm/6weeks	74.7 nm/5months
インダクタンスセンサー 2	51.5 nm/6weeks	90.6 nm/5months
インダクタンスセンサー 3	50.5 nm/6weeks	72.7 nm/5months

表 5.3　長期間の安定性。7 月 10 日〜のデータセットではインダクタンスセンサーの 4 番が故障しているので、1〜3 番のセンサーについて示した。

この結果より、1 ヶ月を超える期間になると必要となる <50nm の安定性が満たせなくなるようある。そのため 1 ヶ月に 1 回は補正係数の再計算が必要になると考えられる。

第 6 章

温度変数

6.1 冶具温度と基板温度の比較

これまでに補正を行うときの温度変数を、冶具の温度 (すなわちセンサーヘッドの温度) と、センサーのコントロールボックス内の基板の温度の 2 種類を使ってきた。どちらを採用するべきかを決定する。

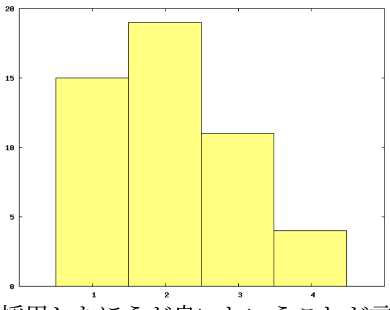
温度変数に冶具温度を用いて得られた安定性を σ_{Jig}nm/week、温度変数に基板温度を用いて得られた安定性を σ_{Board}nm/week とする。それぞれのデータセットごと、センサーヘッドごとに得られた σ_{Jig} と σ_{Board} を用いて、次のような 4 つに場合分けする。

1. $\sigma_{Jig} < \sigma_{Board}$ かつ $\sigma_{Jig}/\sigma_{Board} < 0.9$ の場合
2. $\sigma_{Jig} < \sigma_{Board}$ かつ $0.9 \leq \sigma_{Jig}/\sigma_{Board} \leq 1$ の場合
3. $\sigma_{Jig} > \sigma_{Board}$ かつ $0.9 \leq \sigma_{Board}/\sigma_{Jig} \leq 1$ の場合
4. $\sigma_{Jig} > \sigma_{Board}$ かつ $\sigma_{Board}/\sigma_{Jig} < 0.9$ の場合

1. の場合は、冶具温度での補正のほうが安定性が良くなる場合。
2. の場合は、差は小さいがどちらかと言えば冶具温度での補正のほうが安定性が良くなる場合。
3. の場合は、差は小さいがどちらかと言えば基板温度での補正のほうが安定性が良くなる場合。
4. の場合は、基板温度での補正のほうが安定性が良くなる場合。
にそれぞれ対応している。

各データセット、各センサーヘッドごとに場合分けをしたところ、

- 1. の場合 ⟶ 15 例
- 2. の場合 ⟶ 19 例
- 3. の場合 ⟶ 11 例
- 4. の場合 ⟶ 4 例



となった。この結果からは、温度変数には冶具の温度を採用したほうが良いということが言える。

6.2　冶具/基板温度とインダクタンスセンサーの測定値の関係の詳細

冶具温度と基板温度と、インダクタンスセンサーの測定値の関係を調べるために、冶具温度と基板温度を独立に変化させる実験を行った。実験方法は、測定途中に使い捨てカイロを用いて冶具のみの温度を上げ、その後基板のみの温度を上げるという方法である。測定結果を図 6.1 に示す。

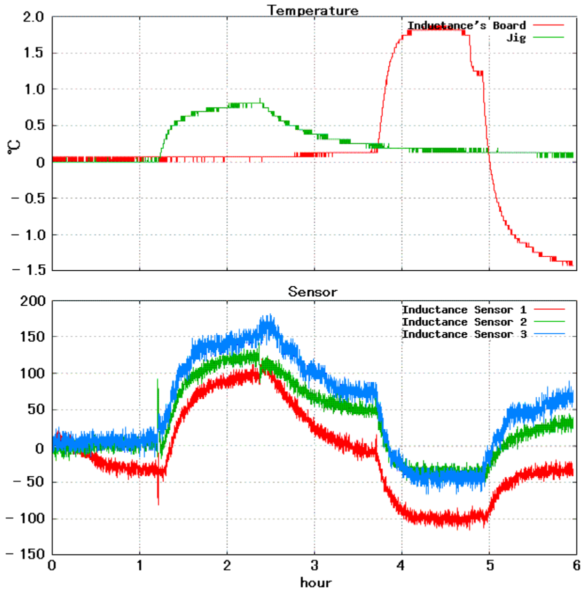


図 6.1　冶具の温度と基板の温度を独立に変化させた実験。　上段赤：基板温度、　上段緑：冶具温度、下段：インダクタンスセンサーの測定値。

この結果から、次のことがわかる。

1. インダクタンスセンサーの測定値は、冶具温度とは正の相関を示し、基板温度とは負の相関を示す。
2. 基板温度に比べて、冶具温度の影響の方が大きい。

これまでの測定結果と補正結果が示すところによると、インダクタンスセンサーの測定値は冶具温度とも基板温度とも正の相関を示していた。しかし、上記 1. のように今回は基板温度に関しては負の相関を示している。このことは次のように説明できる。

冶具温度を t_{Jig}、基板温度を t_{Board} とすると、補正に用いるべき温度 t_0 は上記 1. よりある正の定数 a と b を用いて

$$t_0 = a \times t_{Jig} - b \times t_{Board}$$

$$a > 0, \quad b > 0$$

と表すことができ、また上記 2. より $a > b$ であることがわかる。実際に a、b を求めてみたところ、

$$a = 1.181, \quad b = 0.181$$

であることがわかった。($a - b = 1$ という規格化をしている。)

ところが、実際の測定中は t_{Jig} と t_{Board} はほとんど同じ変化を示す (すなわち $t_{Jig} \simeq t_{Board}$)。そのため t_0 は上の表式より

$$\begin{aligned} t_0 &\simeq 1.181 \times t_{Jig} - 0.181 \times t_{Jig} \\ &\simeq t_{Jig} \quad (\text{or} \quad t_{Board}) \end{aligned}$$

となってしまい、上記 1. の性質がほとんど隠れてしまう。そのため冶具温度にも基板温度にも正の相関を示すように見えるのだと考えられる。さらに、前節で示したように、冶具温度で補正したほうが良い結果が得られるのは、上記の性質のうち 2. の影響と考えられる。

本来ならば、t_0 を求めてそれを補正に用いるのが望ましい。しかし、$t_0 = a \times t_{Jig} - b \times t_{Board}$ の a と b を求めるとき、最小二乗法を用いるが、普通は $t_{Jig} \simeq t_{Board}$ であるので正確な値を最小二乗法で計算することは難しい (上記の $a = 1.181,\ b = 0.181$ は、二つの温度を独立に変化させるという人為的な操作を行った測定から得られた結果である。)。

また、ここで得られた $a = 1.181,\ b = 0.181$ の値を用いて計算した t_0 を温度変数として補正を行ってみたところ、ほとんどの場合で冶具の温度を使った場合よりも補正後の値の安定性は悪化している (全 49 例中、41 例で悪化)。これは各データセットごと、各センサーヘッドごとに最適な a、b の値が異なるからだと考えられる。

先に述べたように、$t_{Jig} \simeq t_{Board}$ となる一般の場合では、a、b の値の計算は難しい。さらに、このような場合では $t_0 \simeq t_{Jig}$ が成立するので、補正のための温度変数は冶具温度を採用することが現実的であると考えられる。

第 7 章

改良型コントロールボックスの性能評価

2006 年 10 月に改良が施されたインダクタンスセンサーのコントロールボックスが納入された。主な改良点は、

1. サンプリング時間が延びた。
2. 対ノイズ性能の向上。
3. カウント ⟶ 距離の変換テーブルの改善

である。

1. については、従来のコントロールボックスで選択できるサンプリング時間は、100μs、200μs、350μs の 3 種類であるが、新しいコントロールボックスで選択できるサンプリング時間は 100μs、200μs、400μs、800μs の 4 種類である。3.2.2 節で述べたように、インダクタンスセンサーは電圧がサンプリング時間中に何回振動するのかをカウントすることで距離を測定している。そのため、サンプリング時間が長ければ長いほどカウント値の精度・安定性が増し、その結果距離の測定値の精度・安定性も増す。よって新型コントロールボックスは旧型コントロールボックスに比べて測定値の精度と安定性が向上されていると期待される。

また、薄型のセンサーヘッドの試作品も納入された。

図 7.1　新型コントロールボックスの外観。ボックス上部のアルミテープは温度センサーを取り付けるためのもの。

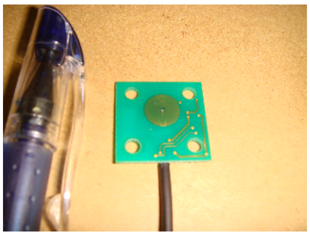


図 7.2　薄型センサーヘッドの試作品。

7.1 新型・旧型、2 つのコントロールボックスを併用する場合の GND の設定

新型と旧型のコントロールボックスの性能を比べるために、2 つのコントロールボックスを併用して測定を行った。するとこれまでに見られなかった非常に激しいノイズが発生した。

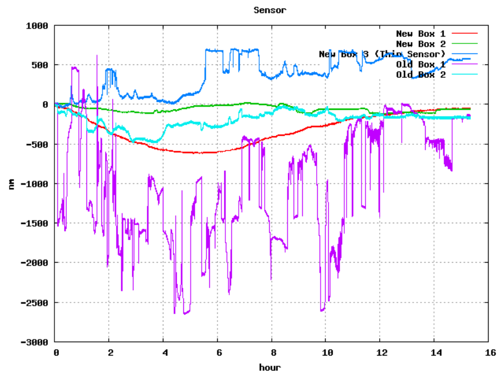


図 7.3 2006 年 11 月 10 日〜のデータ。赤、緑、青：新型のコントロールボックスに接続されたインダクタンスセンサー (青は薄型センサー)。 紫、水：旧型のコントロールボックスに接続されたインダクタンスセンサー。

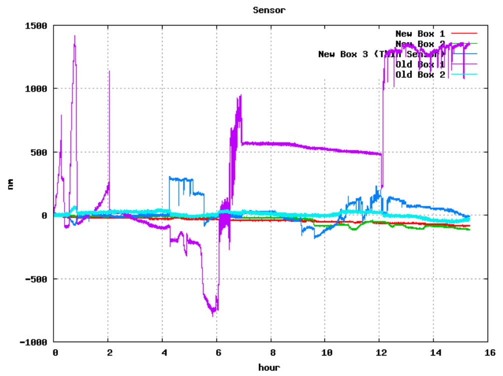


図 7.4 2006 年 11 月 12 日〜のデータ。赤、緑、青：新型のコントロールボックスに接続されたインダクタンスセンサー (青は薄型センサー)。 紫、水：旧型のコントロールボックスに接続されたインダクタンスセンサー。

また、ノイズが発生したセンサーヘッドは、旧型のコントロールボックスに接続したもの、または薄型のものであるのがわかる。

このノイズの原因を調べる過程で、コントロールボックスの GND 電位に関する次のような事実が判明した。

1. 新型コントロールボックスの GND 電位、及びそれに接続された対向金属面の電位と、アース電位の間には交流 60Hz、振幅〜30V の電位差が生じている。
2. 旧型コントロールボックスの GND 電位、及びそれに接続された対向金属面の電位と、アース電位の間には交流 60Hz、振幅〜50V の電位差が生じている。
3. 測定途中で対向金属面の電位を変化させるとノイズが生じる。

1.、2. は周波数が 60Hz であることより、電源由来のものと考えられる。

上記 1.、2.、3. をあわせて考えると、新型コントロールボックスの由来の対向金属面の GND 電位と旧型コントロールボックス由来の対向金属面の GND 電位が互いに干渉し合い、それによる対向金属面の電位の不安定性がノイズの原因と考えられる。

このことと、対向金属面をアースに接地したほうが良いかどうかを調べるために、次のような実験を行った。実験の際の器具の接続図を図 7.5 に示す。ここで図中の 1 と 2 の ON/OFF を切り替えた場合で測定を行う。1 を ON にしたときは対向金属面をアースに接地され、OFF にしたときはアースから切断される。2 を ON にしたときは新型ボックスに接続されたセンサーの対向金属面と旧型ボックスに接続されたセンサー

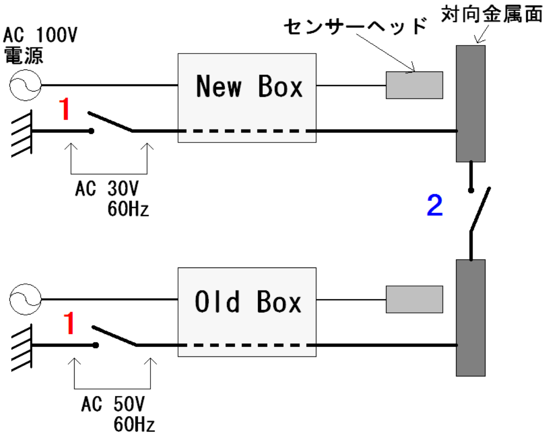


図 7.5　接続図

の対向金属面が接続されて対向金属面で新型ボックス由来の GND 電位と旧型ボックス由来の GND 電位が混ざり合い、OFF にしたときは 2 つの対向金属面が切断されて電位は混ざり合わない。新型ボックスにインダクタンスセンサーを 3 つ、旧型ボックスにも 3 つ接続し、同時に測定を行った。測定を行った時間は 16 時間 40 分であった。

結果を図 7.6〜図 7.9 に示す。

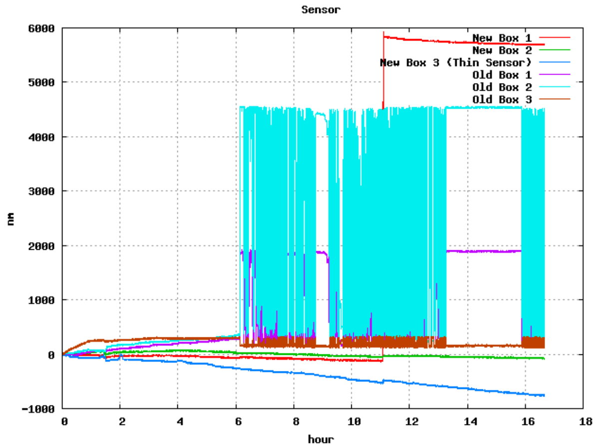


図 7.6　1:ON、2:ON の場合の測定結果。

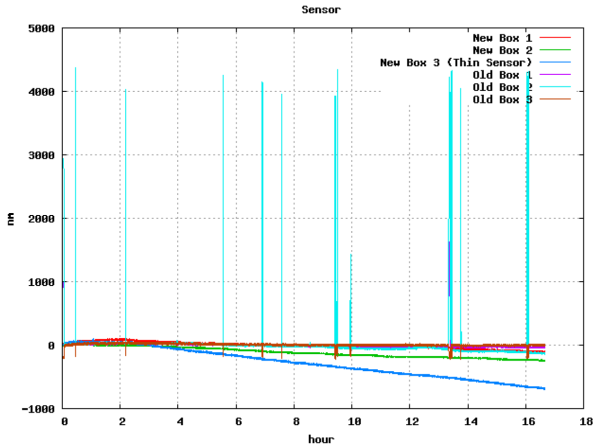


図 7.7　1:OFF、2:ON の場合の測定結果。

以上の測定結果より、1:OFF、2:OFF、すなわち対向金属面同士は電気的に切断し、アースには接地しない場合 (図 7.9) がノイズの無い結果となっている。対向金属面同士を電気的に切断すると改善されることは、上で述べたように新型ボックス由来の GND 電位と旧型ボックス由来の GND 電位が互いに干渉しないようになったことによるものと考えられる。アースしないほうがノイズが入らないことは、おそらくアース電位にノイズが混入しているのではないかと考えられる。図 7.9 には測定値のジャンプが発生している。ケーブルは固定してあったので、このジャンプの原因は対向金属面に溜まった電荷が何かのきっかけで放電したことではないかと考えられる。アースに接地していればこのような現象は防げるが、その場合はノイズが混入する恐れが

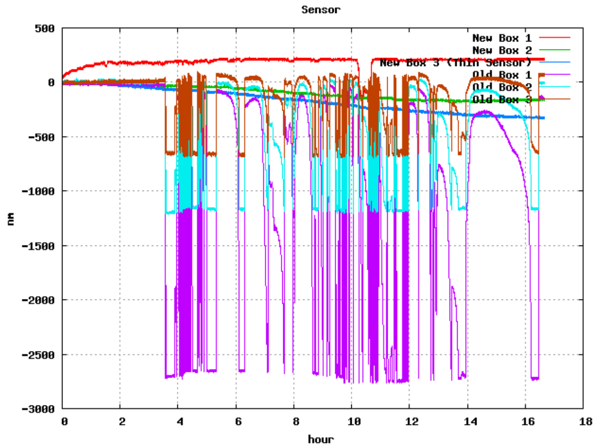


図 7.8　1:ON、2:OFF の場合の測定結果。

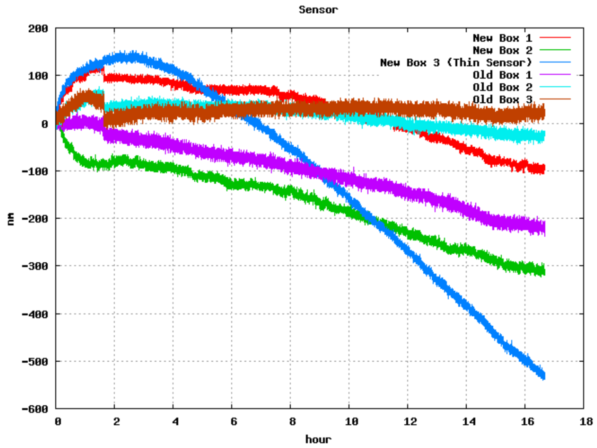


図 7.9　1:OFF、2:OFF の場合の測定結果。

あるので、測定値のジャンプはこの場合やむを得ない。

実際に距離センサーを新技術望遠鏡に組み込んで運用する際は、多数のコントロールボックスを使用することになる。上記の結果より、そのような時は全ての距離センサーの対向金属面の電位を同一の GND に設定することは避け、各コントロールボックスごとに設定したほうが良いと考えられる。

また、図 7.6〜図 7.9 を見てみると、ノイズが発生しているのは旧型ボックスに接続されたセンサー (紫、水、茶で表されている) であり、新型ボックスに接続されたセンサー (赤、緑、青で表されている) にはノイズが発生していないか、発生していてもわずかである。よって、新型ボックスのほうが対ノイズ性能が高いということができる。

7.2　新型・旧型コントロールボックスの安定性の比較

前節で導かれた GND の設定を用いて新型ボックスと旧型ボックスの安定性の比較を行った。測定方法は、新型ボックスと旧型ボックスにそれぞれ 3 つずつインダクタンスセンサーを接続し、16 時間 40 分測定を行う。その際に、気圧と湿度の測定も同時に行う。ただし、今回はコンピューターの接続ポート数の制限より、温度を測定することはできなかった。

測定結果を図 7.10〜図 7.12 に示す。

いずれのデータでもインダクタンスセンサーは湿度と正の相関を示している。このことは以前の実験結果と同じである。しかし、新型ボックスに接続したインダクタンスセンサーは、旧型ボックスに接続したものと比較して、湿度により過敏に反応していると言える。そのため新型ボックスの方が長期安定性という点では劣っていると言うことができる。

一方、新型ボックスに接続したインダクタンスセンサーの測定値のホワイトノイズは、旧型ボックスに接続したものの測定値のホワイトノイズに比べて小さいということが分かる。ホワイトノイズの値は rms で

新型ボックス：〜4nm

旧型ボックス：〜7nm

であった。新型ボックスのサンプリング時間は 400μs、旧型ボックスは 350μs であるので、この新型ボックスのホワイトノイズの値の減少は、サンプリング時間の増加によるもの以上のものであり、新型ボックスのほ

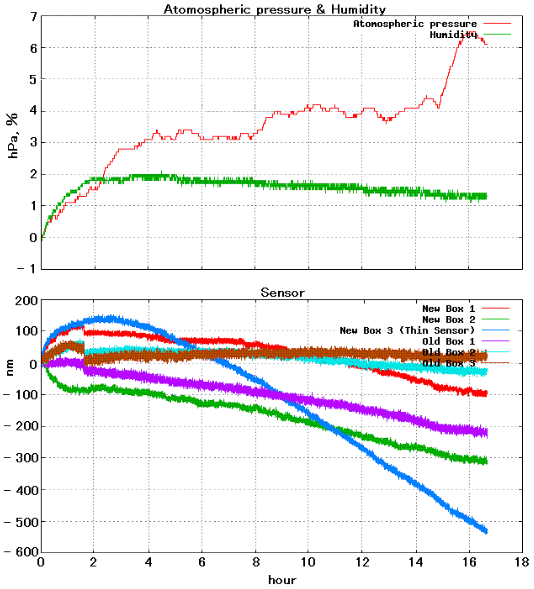


図 7.10　2006 年 12 月 4 日の測定データ。上段赤：気圧、　上段緑：湿度、　下段赤、緑、青：新型ボックスに接続したインダクタンスセンサー、　下段紫、水、茶：旧型ボックスに接続したインダクタンスセンサー。

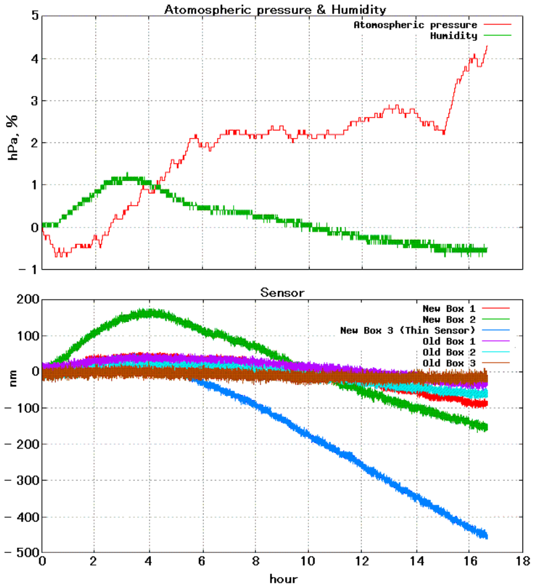


図 7.11　2006 年 12 月 5 日の測定データ。上段赤：気圧、　上段緑：湿度、　下段赤、緑、青：新型ボックスに接続したインダクタンスセンサー、　下段紫、水、茶：旧型ボックスに接続したインダクタンスセンサー。

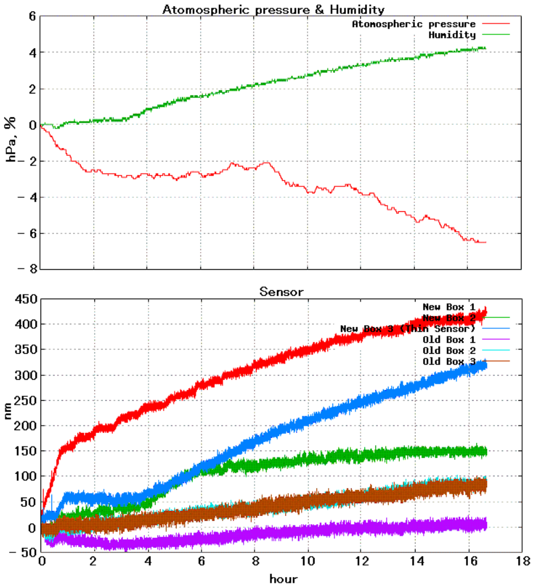


図 7.12　2006 年 12 月 7 日の測定データ。上段赤：気圧、　上段緑：湿度、　下段赤、緑、青：新型ボックスに接続したインダクタンスセンサー、　下段紫、水、茶：旧型ボックスに接続したインダクタンスセンサー。

うが測定の精度が高いと言える。

7.3　新型コントロールボックスの補正

新型ボックスの測定値がどこまで補正できるかを調べるため、旧型ボックスを取り外し新型ボックスのみで測定を行った。このときの GND の設定は 7.1 節で決定した方法で行った。また、温度と湿度、気圧も同時に測定を行った。測定結果を図 7.13 に示す。

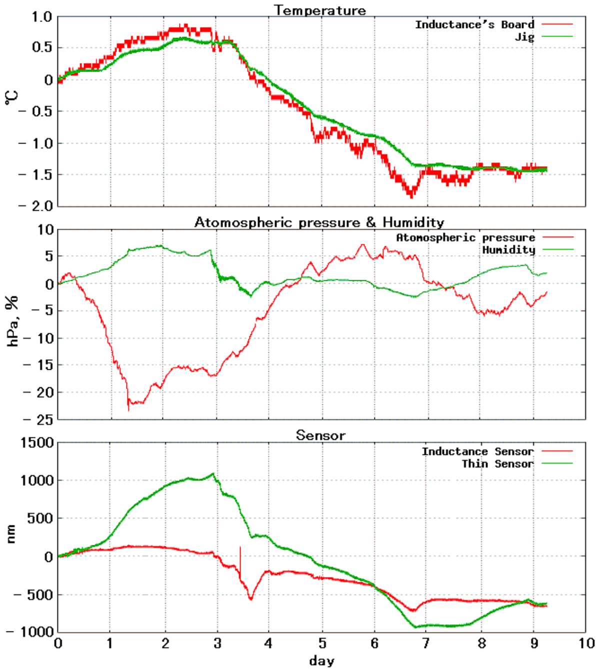


図 7.13　2006 年 12 月 25 日〜の測定結果。　上段赤：インダクタンスセンサーの基板の温度。　上段緑：冶具の温度。　中段赤：気圧。　中段緑：湿度。　下段赤：インダクタンスセンサー (従来型) の測定値。　下段緑：インダクタンスセンサー (薄型) の測定値。　いずれの値も測定開始時点の値からの増分を表している。

どちらの距離センサーも温度と湿度に正の相関を示していることがわかる。しかし、どちらのセンサーも変動が非常に大きいことがわかる。2 つのセンサーの安定性を下に示す。

従来型インダクタンスセンサー	薄型インダクタンスセンサー
283.3 nm/week	637.2 nm/week

今回の測定では温度の範囲、水蒸気量の範囲ともに、これまで旧型ボックスを用いた測定の場合と大きく変わっていない。旧型ボックスを使用した場合、ノイズやジャンプが発生しない限り、ほぼ < 100 nm/week である (表 5.1、表 5.2 参照)。しかしこの表のように、新型ボックスを使用した場合は、旧型ボックスを使用した場合と比較して、大幅に安定性が悪化している。

新型ボックスは温度・水蒸気量に敏感に反応しているが、温度・水蒸気量との相関は旧型ボックスと同じなので、従来通りの水蒸気量と温度を変数とする方法で補正を行った。まず比較のため、補正前のインダクタン

スセンサーの測定値を図 7.14 に示す。

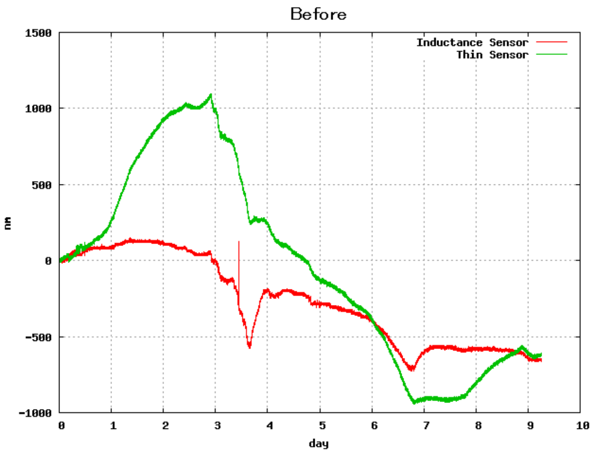


図 7.14　2006 年 12 月 25 日〜の補正する前の測定値

次に冶具の温度を変数として補正した結果を図 7.15 に、基板の温度を変数として補正した結果を図 7.16 に示す。

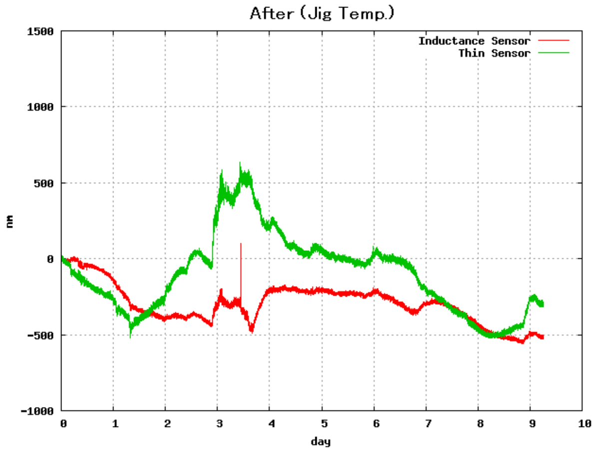


図 7.15　2006 年 12 月 25 日〜の水蒸気量と冶具温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

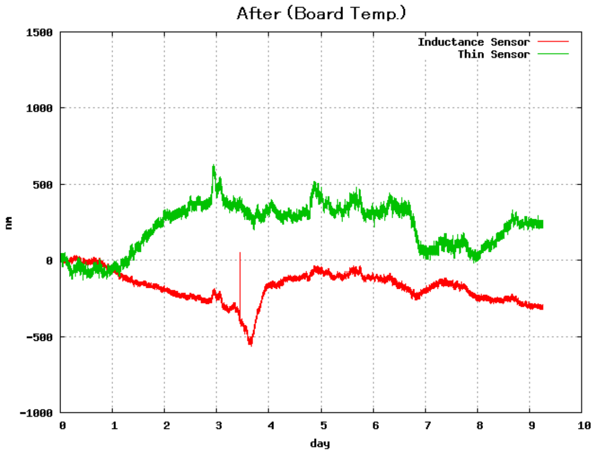


図 7.16　2006 年 12 月 25 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

また、補正前後の安定性を表 7.1 に示す。

センサー	補正前	補正後 (冶具温度)	補正後 (基板温度)
インダクタンス 1	283.3 nm/week	129.2 nm/week	102.2 nm/week
インダクタンス 2	637.2 nm/week	258.4 nm/week	155.7 nm/week

表 7.1　2006 年 12 月 25 日〜のデータセットの安定性。小数点第 2 位を四捨五入してある。

このように従来の方法で補正を行った場合、温度変数に冶具温度、基板温度のどちらを使用しても、必要と

する ＜ 50 nm/week の安定性を満たしていない。

また、従来型インダクタンスセンサーの測定値の、補正平面からの距離を x 軸に水蒸気量、y 軸に治具温度をとったグラフに色別にプロットしたものを図 7.17 に示す。

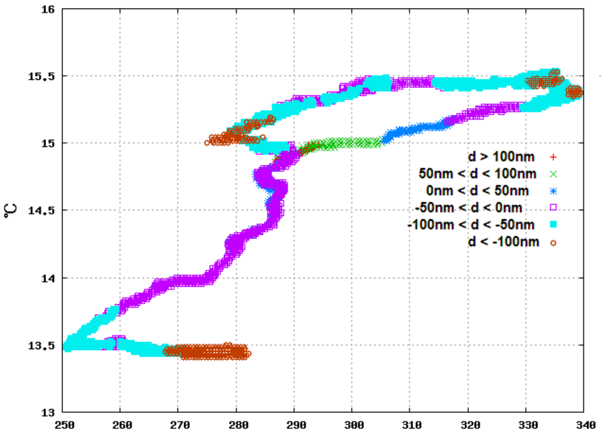


図 7.17　従来型インダクタンスセンサーの測定値の、補正平面からの距離。　赤：補正平面からの距離が ＞ 100nm、　緑：補正平面からの距離が 50nm 〜 100nm、　青：補正平面からの距離が 0nm 〜 50nm、　紫：補正平面からの距離が -50nm 〜 0nm、　水：補正平面からの距離が -100nm 〜 -50nm、　茶：補正平面からの距離が ＜ -100nm

このグラフにプロットされてできた経路は、時間とともに温度と水蒸気量が変化していく様子を表している。色の変化を見てみると、補正平面からの距離が経路に沿って、すなわち時間とともに変化していく様子が見られる。補正平面は約 10 日間のデータセットから求められているが、図 7.17 に示されたことより、新型ボックスの補正係数は 1 日程度かそれ以下の短い時間しか有効でないのではないかとも考えられる。

第Ⅲ部

まとめ

第 8 章

結論

以上、新技術望遠鏡分割主鏡制御システム用精密位置センサーの試験測定を行ってきた。その結論を以下に示す。

精密位置センサーに求められる条件は、50nm 以上の精度を持ち、その精度を長期間保てる安定性があることである (2.4 節参照)。

シグマ光機社製のインダクタンスセンサーとテクノシステム社製の静電容量センサーを比較したところ、どちらも 1 週間程度の期間にわたって 50nm の精度を安定的に保つことができなかった。しかし、2 種類の距離センサーの測定値はともに水蒸気量と温度に比例することがわかった。そこで、水蒸気量と温度の 2 つを変数として補正することによって安定性を改善することができ、インダクタンスセンサーは必要とする安定性を満たすことができた。(3 章参照)

また、補正に用いる補正係数は、距離センサーの測定値が水蒸気量と温度の 1 次式で表されるとして、最小二乗法を用いて求める。50nm 以下の安定性を長期にわたって保つためには、この補正係数の計算を少なくとも 1 ヶ月に 1 回は行う必要がある (5.2 節参照)。さらに、補正のための温度変数として冶具の温度 (すなわちセンサーヘッドの温度) を採用すると良い (6 章参照)。

インダクタンスセンサーには、測定値のジャンプ、環境応答特性の逆転、ノイズの発生といった問題点がある。このうち測定値のジャンプは、ケーブルを固定することによって防ぐことが可能。他の 2 つの問題点の解決策は今のところ不明であり、今後の課題である。(4 章参照)

改良型コントロールボックスは従来型コントロールボックスと比較して、ホワイトノイズが小さいので測定精度が高く、また外部由来のノイズに対しても強い。しかし、環境変化に対して敏感にに反応することから、長期の安定性という点では劣る (7.3 節参照)。そこで、2 種類のコントロールボックスの利点を組み合わせた (すなわち旧型ボックスの長期安定性と新型ボックスの測定精度・対ノイズ性能を持った) コントロールボックスの開発が求められる。

謝辞

今回の研究を行うにあたっては、指導教官の岩室史英助教授には最初から最後までご指導頂きました。ハードウェアの設定方法からプログラムの内容、実験の方針に至るまで本当にたくさんの事でお世話になりました。この論文をまとめることができた事自体、岩室先生のおかげと思っております。本当にありがとうございます。

また、新技術望遠鏡検討会議のメンバーである、ナノオプトニクス研究所の舞原所長、宇宙物理学教室の教官の長田教授、太田助教授、附属天文台の柴田台長、野上助手、基礎物理学研究所の嶺重教授、吉田台長を始めとする岡山天体物理観測所の皆様、佐藤教授を始めとする名古屋大学 Z 研の皆様にも、毎週の TV 会議で私の気づかなかった点の指摘や適切なアドバイス、励ましのお言葉をたびたび頂き、研究の助けとなりました。

さらに、宇宙物理学教室の諸先輩方にも大変お世話になりました。特に下農さんには回路・プログラム関係で様々なアドバイスを頂きました。また同室の永山さんには、学会等の発表の仕方、研究者としての心構えなどを教えて頂きました。

また、実験で使用したインダクタンスセンサーの製造元であるシグマ光機の皆様にも感謝いたします。開発者の方々とは数回にわたって意見の交換をさせて頂き、またインダクタンスセンサーの様々な情報を教えて頂きました。これらの情報が実験方針を決定する基礎となりました。

また、宇宙物理学教室の同級生達にも、大学院生活を送る上での心の支えとなってくれました。

この研究に関わった全ての方に感謝いたします。

付録 A

全データセット

■2005 年 11 月 30 日〜のデータ　測定結果を図 A.1 に示す。また、位置センサーの測定値の拡大図を図 A.2 に示す。

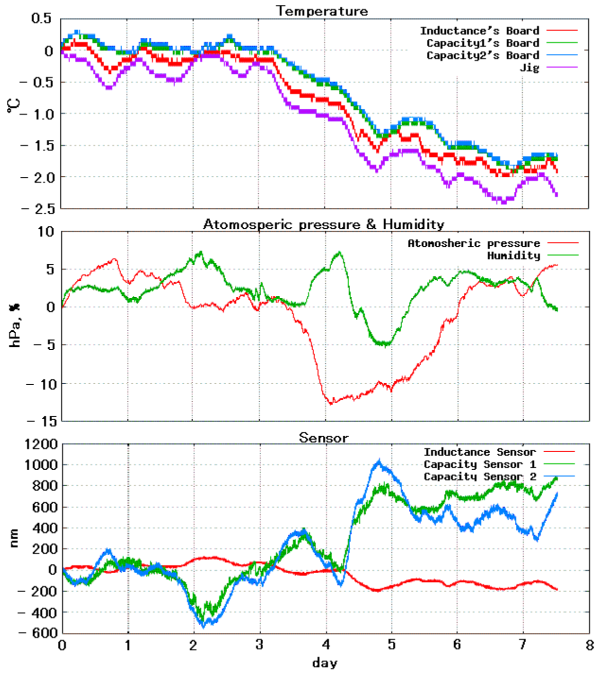


図 A.1　2005 年 11 月 30 日〜の測定結果。　上段赤：インダクタンスセンサーの基板の温度。　上段緑、青：静電容量センサー 1、2 の基板の温度。　上段紫：冶具の温度。　中段赤：気圧。　中段緑：湿度。　下段赤：インダクタンスセンサーの測定値。　下段緑、青：静電容量センサー 1、2 の測定値。　いずれの値も測定開始時点の値からの増分を表している。

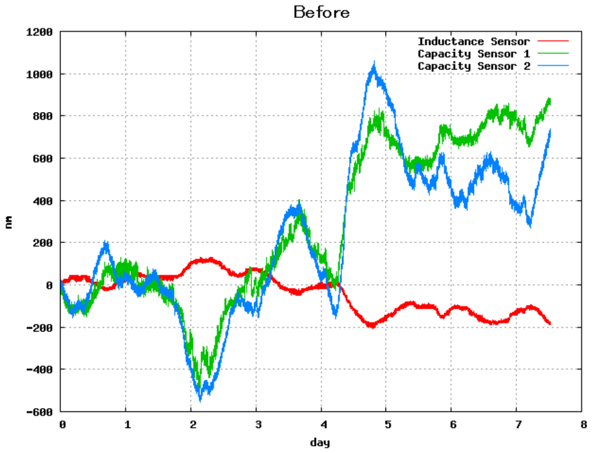


図 A.2　2005 年 11 月 30 日〜の補正する前の精密位置センサーの測定値。　赤：インダクタンスセンサー　緑、青：静電容量センサー 1、2

水蒸気量と温度を変数に補正を行った。その補正係数を表 A.1 に示す。

温度変数	冶具温度を使用			基板温度を使用		
センサー	A	B	C	A	B	C
インダクタンス	1.616	72.649	324639.171	1.834	71.558	324201.245
静電容量 1	-6.107	-320.482	335230.166	-6.699	-330.435	337348.960
静電容量 2	-13.009	-96.597	303514.879	-13.434	-89.742	304028.735

表 A.1　2005 年 11 月 30 日〜のデータの補正係数。

補正結果を図 A.3、図 A.4 に示す。

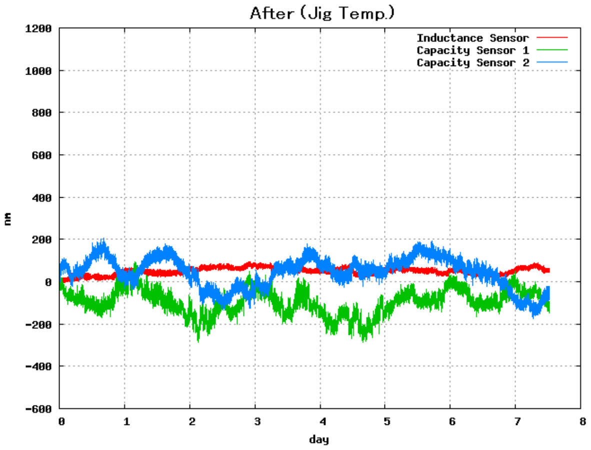


図 A.3　2005 年 11 月 30 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後の精密位置センサーの測定値。　赤：インダクタンスセンサー　緑、青：静電容量センサー 1、2

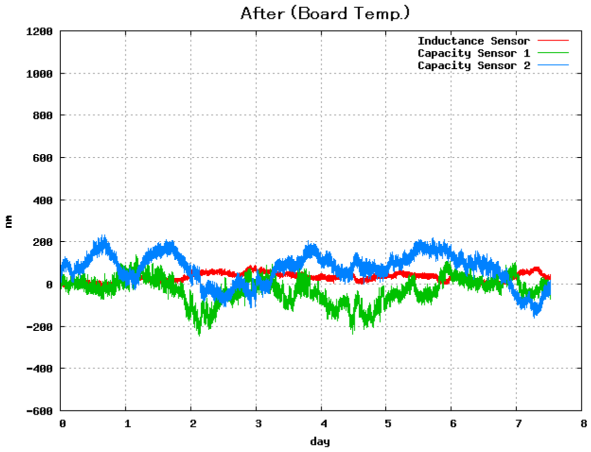


図 A.4　2005 年 11 月 30 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後の精密位置センサーの測定値。　赤：インダクタンスセンサー　緑、青：静電容量センサー 1、2

安定性を表 A.2 に示す。

センサー	補正前	補正後 (冶具温度)	補正後 (基板温度)
インダクタンス	90.4 nm/week	16.4 nm/week	19.8 nm/week
静電容量 1	376.2 nm/week	60.0 nm/week	61.7 nm/week
静電容量 2	362.1 nm/week	71.8 nm/week	74.8 nm/week

表 A.2　2005 年 11 月 30 日〜のデータセットの安定性。小数点第 2 位を四捨五入してある。

■2005 年 12 月 26 日〜のデータ　測定結果を図 A.5 に示す。また、位置センサーの測定値の拡大図を図 A.6 に示す。

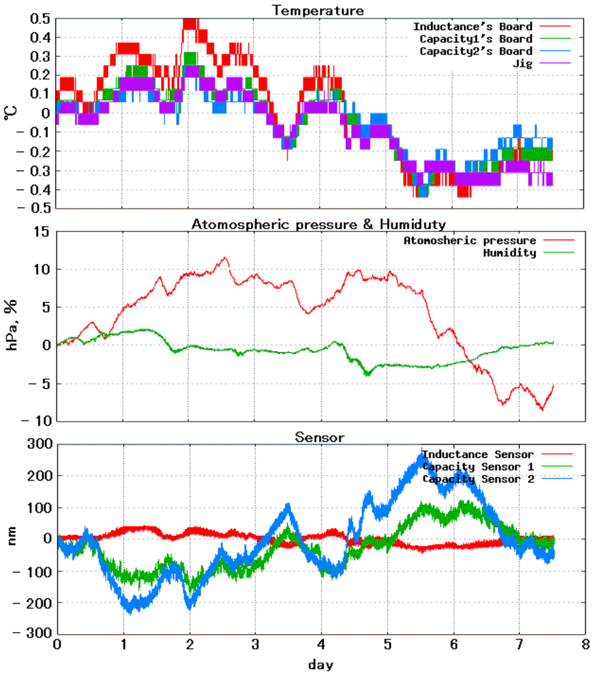


図 A.5　2005 年 12 月 26 日〜の測定結果。　上段赤：インダクタンスセンサーの基板の温度。　上段緑、青：静電容量センサー 1、2 の基板の温度。　上段紫：冶具の温度。　中段赤：気圧。　中段緑：湿度。　下段赤：インダクタンスセンサーの測定値。　下段緑、青：静電容量センサー 1、2 の測定値。　いずれの値も測定開始時点の値からの増分を表している。

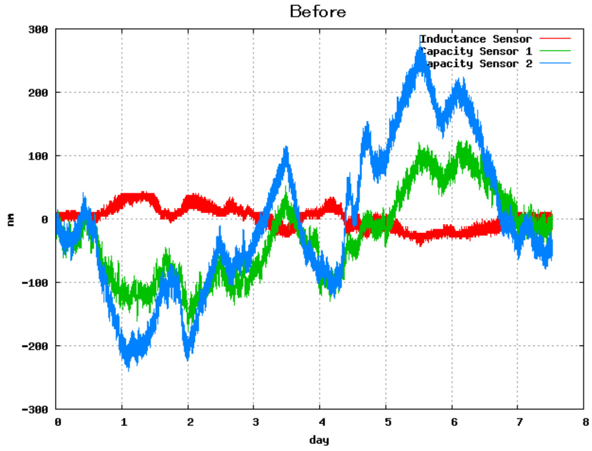


図 A.6　2005 年 12 月 26 日〜の補正する前の精密位置センサーの測定値。　赤：インダクタンスセンサー　緑、青：静電容量センサー 1、2

また、11 月 30 日〜のデータセットと同じように、水蒸気量と温度を変数に補正を行った。その補正係数を表 A.3 に示す。

温度変数	冶具温度を使用			基板温度を使用		
センサー	A	B	C	A	B	C
インダクタンス	1.218	38.840	325040.422	1.030	32.623	325002.129
静電容量 1	-2.227	-266.772	333395.532	-0.867	-227.073	333691.317
静電容量 2	-10.410	-154.334	303208.936	-8.580	-175.181	303858.441

表 A.3　2005 年 12 月 26 日〜のデータの補正係数。

補正結果を図 A.7、図 A.8 に示す。

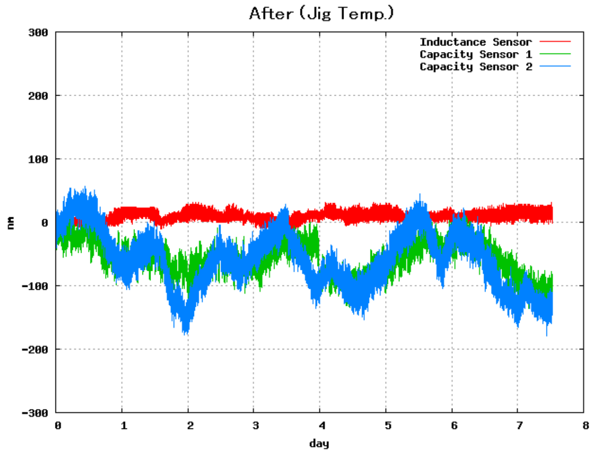


図 A.7　2005 年 12 月 26 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後の精密位置センサーの測定値。　赤：インダクタンスセンサー　緑、青：静電容量センサー 1、2

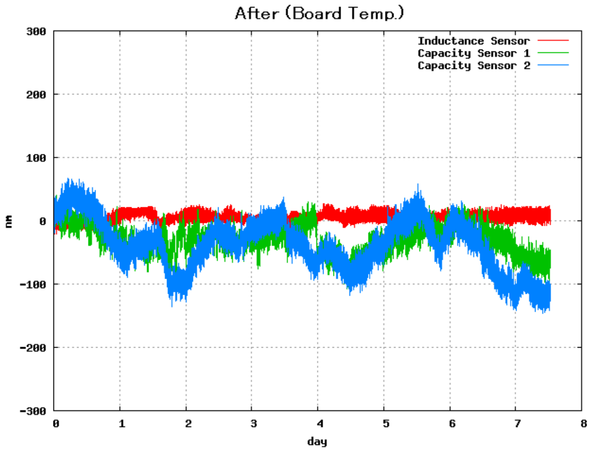


図 A.8　2005 年 12 月 26 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後の精密位置センサーの測定値。　赤：インダクタンスセンサー　緑、青：静電容量センサー 1、2

安定性を表 A.4 に示す。

センサー	補正前	補正後 (冶具温度)	補正後 (基板温度)
インダクタンス	17.5 nm/week	6.6 nm/week	6.3 nm/week
静電容量 1	68.5 nm/week	27.2 nm/week	22.5 nm/week
静電容量 2	120.4 nm/week	45.1 nm/week	40.4 nm/week

表 A.4　2005 年 12 月 26 日〜のデータセットの安定性。小数点第 2 位を四捨五入してある。

■2006 年 1 月 13 日〜のデータ　測定結果を図 A.9 に示す。また、位置センサーの測定値の拡大図を図 A.10 に示す。

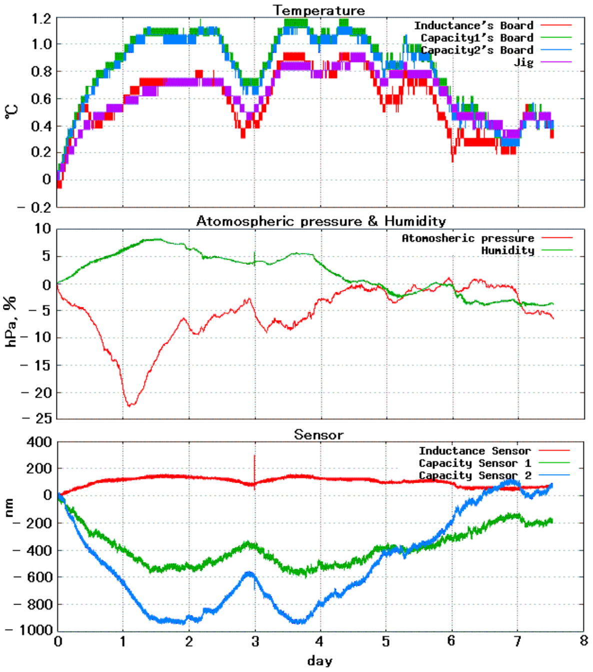


図 A.9　2006 年 1 月 13 日〜の測定結果。　上段赤：インダクタンスセンサーの基板の温度。　上段緑、青：静電容量センサー 1、2 の基板の温度。　上段紫：冶具の温度。　中段赤：気圧。　中段緑：湿度。　下段赤：インダクタンスセンサーの測定値。　下段緑、青：静電容量センサー 1、2 の測定値。　いずれの値も測定開始時点の値からの増分を表している。

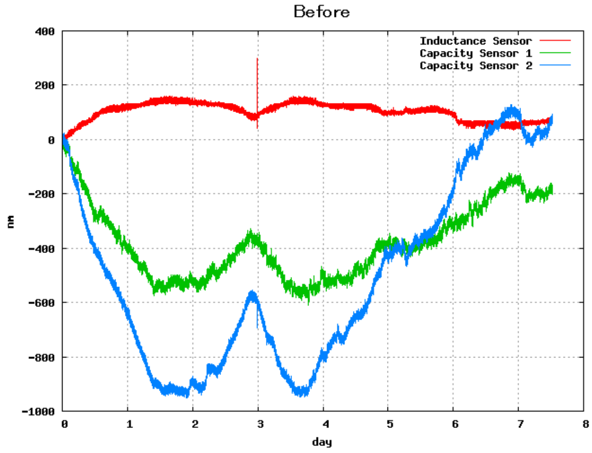


図 A.10　2006 年 1 月 13 日〜の補正する前の精密位置センサーの測定値。　赤：インダクタンスセンサー　緑、青：静電容量センサー 1、2

また、11 月 30 日〜のデータセットと同じように、水蒸気量と温度を変数に補正を行った。その補正係数を表 A.5 に示す。

温度変数	冶具温度を使用			基板温度を使用		
センサー	A	B	C	A	B	C
インダクタンス	0.326	147.305	323872.344	0.142	125.590	323549.285
静電容量 1	-3.231	-482.086	335927.082	-2.644	-408.770	336949.463
静電容量 2	-13.245	-639.492	309252.256	-12.199	-584.604	311265.750

表 A.5　2006 年 1 月 13 日〜のデータの補正係数。

補正結果を図 A.11、図 A.12 に示す。

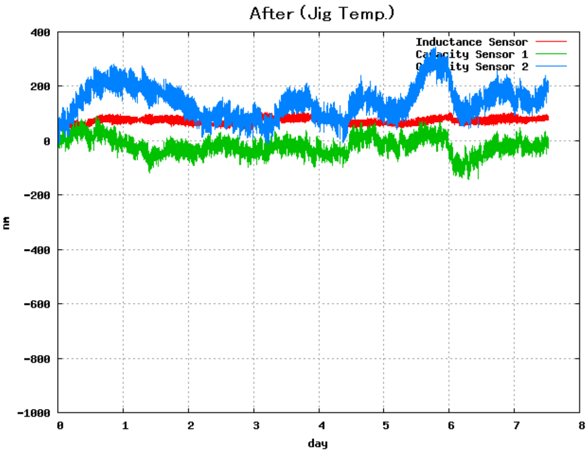


図 A.11　2006 年 1 月 13 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後の精密位置センサーの測定値。　赤：インダクタンスセンサー　緑、青：静電容量センサー 1、2

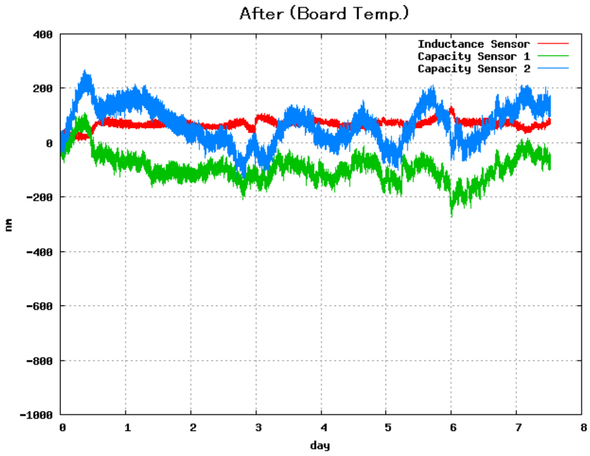


図 A.12　2006 年 1 月 13 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後の精密位置センサーの測定値。　赤：インダクタンスセンサー　緑、青：静電容量センサー 1、2

安定性を表 A.6 に示す。

センサー	補正前	補正後 (冶具温度)	補正後 (基板温度)
インダクタンス	41.8 nm/week	10.0 nm/week	15.7 nm/week
静電容量 1	135.9 nm/week	32.4 nm/week	51.7 nm/week
静電容量 2	337.9 nm/week	60.1 nm/week	70.7 nm/week

表 A.6　2006 年 1 月 13 日〜のデータセットの安定性。小数点第 2 位を四捨五入してある。

■2006 年 1 月 23 日〜のデータ　測定結果を図 A.13 に示す。また、位置センサーの測定値の拡大図を図 A.14 に示す。

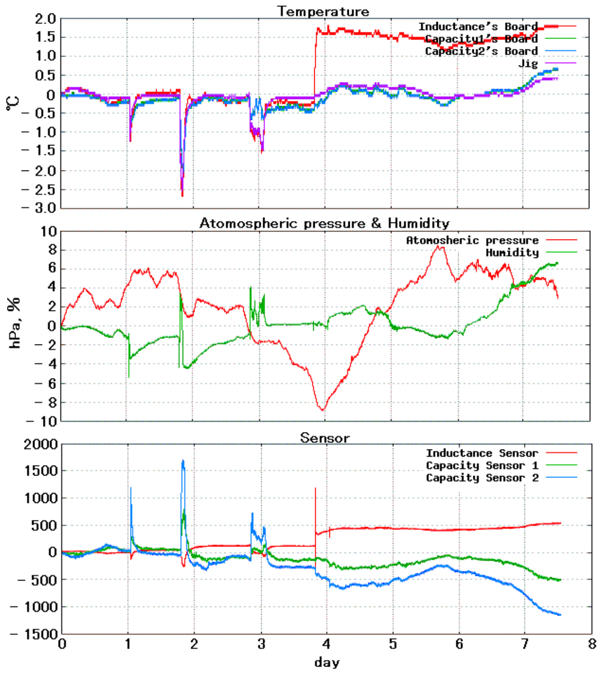


図 A.13　2006 年 1 月 23 日〜の測定結果。　上段赤：インダクタンスセンサーの基板の温度。　上段緑、青：静電容量センサー 1、2 の基板の温度。　上段紫：冶具の温度。　中段赤：気圧。　中段緑：湿度。　下段赤：インダクタンスセンサーの測定値。　下段緑、青：静電容量センサー 1、2 の測定値。　いずれの値も測定開始時点の値からの増分を表している。

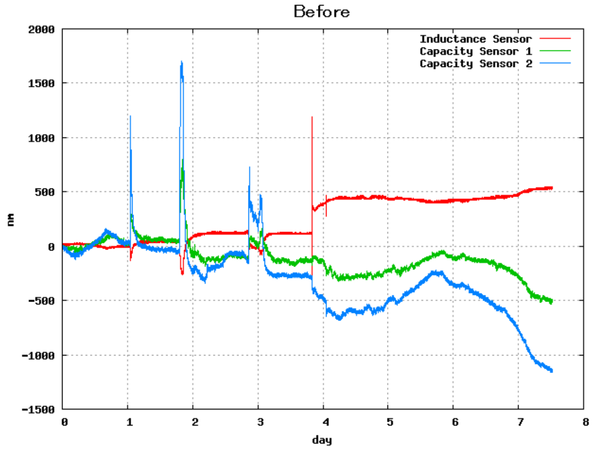


図 A.14　2006 年 1 月 23 日〜の補正する前の精密位置センサーの測定値。　赤：インダクタンスセンサー　緑、青：静電容量センサー 1、2

また、11 月 30 日〜のデータセットと同じように、水蒸気量と温度を変数に補正を行った。その補正係数を表 A.7 に示す。

温度変数	冶具温度を使用			基板温度を使用		
センサー	A	B	C	A	B	C
インダクタンス	2.533	96.100	324099.280	2.173	35.166	324659.976
静電容量 1	-7.740	-194.475	333540.127	-7.240	-66.697	332381.190
静電容量 2	-16.161	-515.278	308041.535	-13.142	-210.016	305151.772

表 A.7　2006 年 1 月 23 日〜のデータの補正係数。

補正結果を図 A.15、図 A.16 に示す。

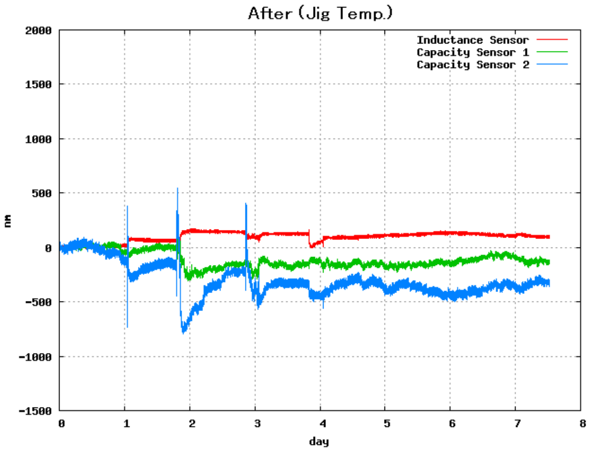


図 A.15　2006 年 1 月 23 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後の精密位置センサーの測定値。　赤：インダクタンスセンサー　緑、青：静電容量センサー 1、2

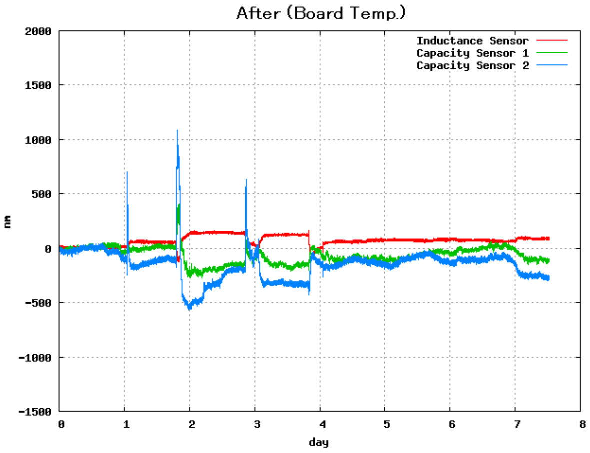


図 A.16　2006 年 1 月 23 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後の精密位置センサーの測定値。　赤：インダクタンスセンサー　緑、青：静電容量センサー 1、2

安定性を表 A.8 に示す。

センサー	補正前	補正後 (冶具温度)	補正後 (基板温度)
インダクタンス	370.9 nm/week	43.8 nm/week	44.1 nm/week
静電容量 1	157.2 nm/week	74.1 nm/week	76.4 nm/week
静電容量 2	354.9 nm/week	157.9 nm/week	147.6 nm/week

表 A.8　2006 年 1 月 23 日〜のデータセットの安定性。小数点第 2 位を四捨五入してある。

■2006 年 2 月 1 日〜のデータ　測定結果を図 A.17 に示す。また、位置センサーの測定値の拡大図を図 A.18 に示す。

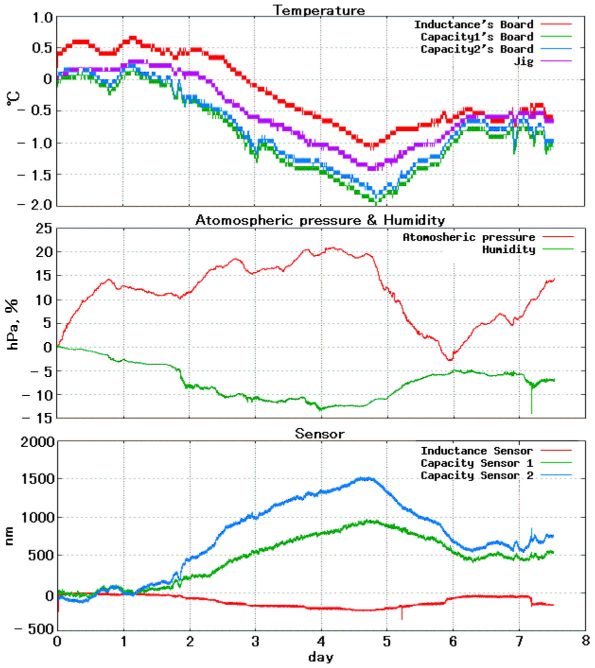


図 A.17　2006 年 2 月 1 日〜の測定結果。　上段赤：インダクタンスセンサーの基板の温度。　上段緑、青：静電容量センサー 1、2 の基板の温度。　上段紫：冶具の温度。　中段赤：気圧。　中段緑：湿度。　下段赤：インダクタンスセンサーの測定値。　下段緑、青：静電容量センサー 1、2 の測定値。　いずれの値も測定開始時点の値からの増分を表している。

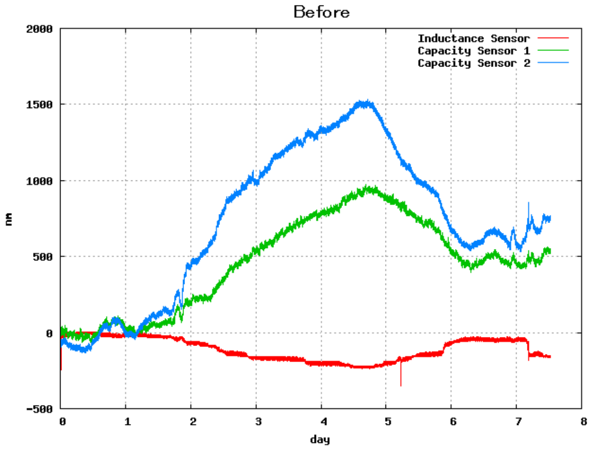


図 A.18　2006 年 2 月 1 日〜の補正する前の精密位置センサーの測定値。　赤：インダクタンスセンサー　緑、青：静電容量センサー 1、2

また、11 月 30 日〜のデータセットと同じように、水蒸気量と温度を変数に補正を行った。その補正係数を表 A.9 に示す。

温度変数	冶具温度を使用			基板温度を使用		
センサー	A	B	C	A	B	C
インダクタンス	3.835	-46.364	325867.965	4.215	-73.752	326595.024
静電容量 1	-3.357	-440.762	335198.929	-6.411	-310.668	336544.304
静電容量 2	-14.657	-295.707	305062.860	-17.140	-183.022	305603.296

表 A.9　2006 年 2 月 1 日〜のデータの補正係数。

補正結果を図 A.19、図 A.20 に示す。

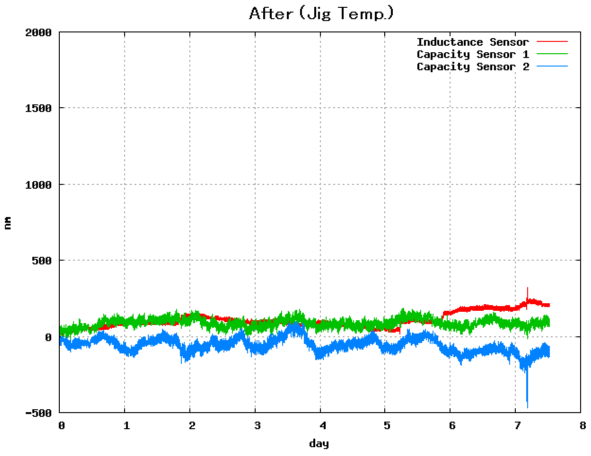


図 A.19　2006 年 2 月 1 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後の精密位置センサーの測定値。　赤：インダクタンスセンサー　緑、青：静電容量センサー 1、2

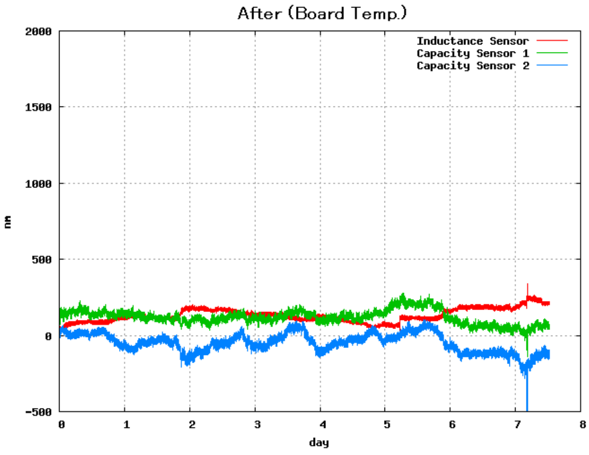


図 A.20　2006 年 2 月 1 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後の精密位置センサーの測定値。　赤：インダクタンスセンサー　緑、青：静電容量センサー 1、2

安定性を表 A.10 に示す。

センサー	補正前	補正後 (治具温度)	補正後 (基板温度)
インダクタンス	726.3 nm/week	49.9 nm/week	43.8 nm/week
静電容量 1	304.8 nm/week	28.0 nm/week	46.7 nm/week
静電容量 2	492.2 nm/week	47.6 nm/week	64.8 nm/week

表 A.10　2006 年 2 月 1 日〜のデータセットの安定性。小数点第 2 位を四捨五入してある。インダクタンスセンサーの補正前の安定性がグラフよりも著しく悪いのは、このデータセットではジャンプが発生しているためであり、グラフはジャンプの消去後のものであるためである。

■2006 年 2 月 27 日〜のデータ　測定結果を図 A.21 に示す。また、位置センサーの測定値の拡大図を図 A.22 に示す。

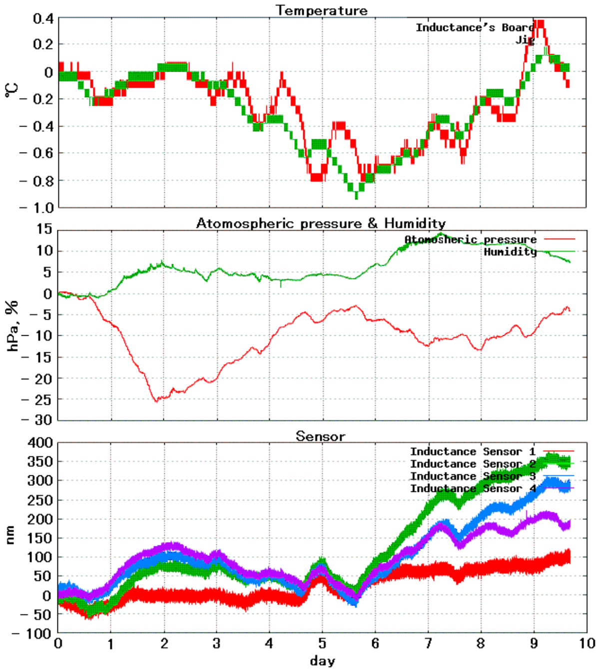


図 A.21　2006 年 2 月 27 日〜の測定結果。　上段赤：インダクタンスセンサーの基板の温度。　上段緑：冶具の温度。　中段赤：気圧。　中段緑：湿度。　下段赤〜紫：インダクタンスセンサーの測定値。いずれの値も測定開始時点の値からの増分を表している。

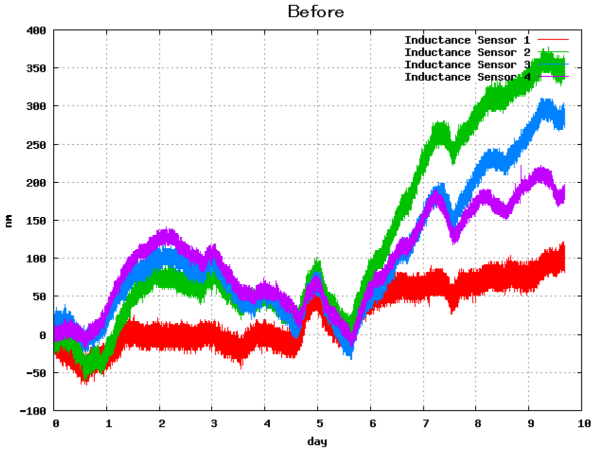


図 A.22　2006 年 2 月 27 日〜の補正する前のインダクタンスセンサーの測定値。

また、11 月 30 日〜のデータセットと同じように、水蒸気量と温度を変数に補正を行った。その補正係数を表 A.11 に示す。

温度変数	冶具温度を使用			基板温度を使用		
センサー	A	B	C	A	B	C
インダクタンス 1	1.676	-27.996	372205.356	1.621	-29.101	372390.810
インダクタンス 2	5.300	42.025	436465.266	5.386	51.266	436051.148
インダクタンス 3	3.490	99.935	371053.828	3.684	97.390	370508.070
インダクタンス 4	2.673	69.263	319377.516	2.807	65.025	319043.566

表 A.11　2006 年 2 月 27 日〜のデータの補正係数。

補正結果を図 A.23、図 A.24 に示す。

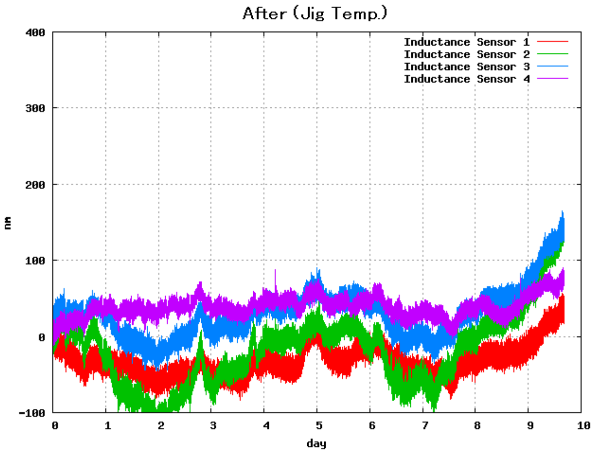


図 A.23　2006 年 2 月 27 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

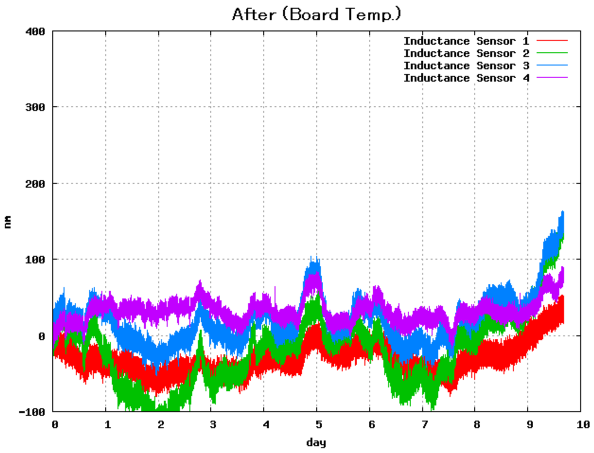


図 A.24　2006 年 2 月 27 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

安定性を表 A.12 に示す。

センサー	補正前	補正後 (冶具温度)	補正後 (基板温度)
インダクタンス 1	40.1 nm/week	20.2 nm/week	20.1 nm/week
インダクタンス 2	121.6 nm/week	48.9 nm/week	48.3 nm/week
インダクタンス 3	86.3 nm/week	32.3 nm/week	33.0 nm/week
インダクタンス 4	61.9 nm/week	13.5 nm/week	15.1 nm/week

表 A.12　2006 年 2 月 27 日〜のデータセットの安定性。小数点第 2 位を四捨五入してある。

■2006 年 3 月 12 日〜のデータ　測定結果を図 A.25 に示す。また、位置センサーの測定値の拡大図を図 A.26 に示す。

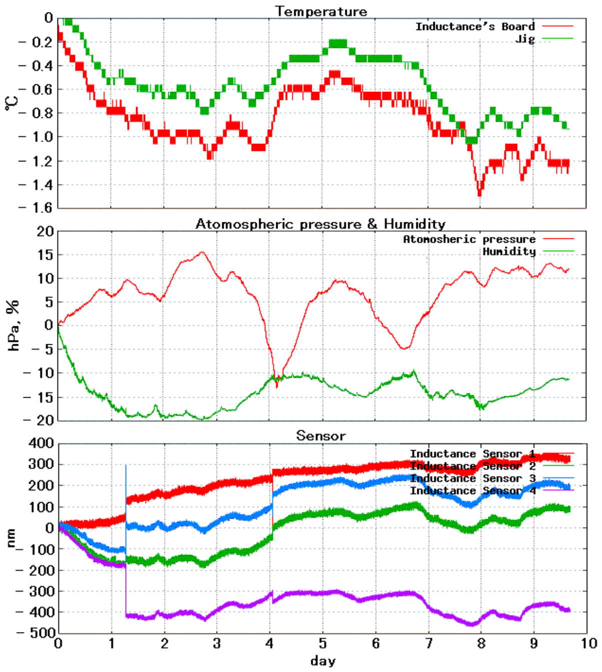


図 A.25　2006 年 3 月 12 日〜の測定結果。　上段赤：インダクタンスセンサーの基板の温度。　上段緑：冶具の温度。　中段赤：気圧。　中段緑：湿度。　下段赤〜紫：インダクタンスセンサーの測定値。いずれの値も測定開始時点の値からの増分を表している。

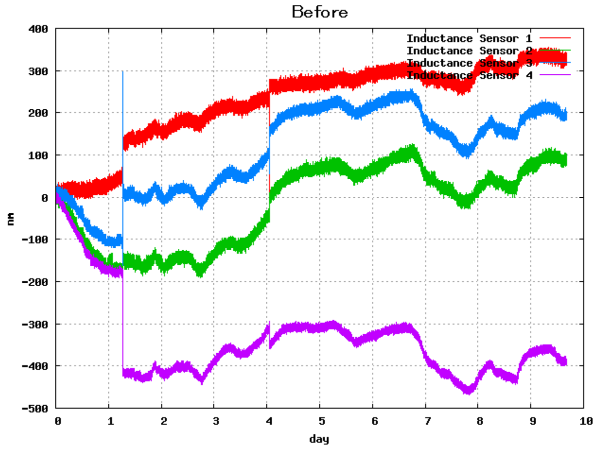


図 A.26　2006 年 3 月 12 日〜の補正する前のインダクタンスセンサーの測定値。

また、11 月 30 日〜のデータセットと同じように、水蒸気量と温度を変数に補正を行った。その補正係数を表 A.13 に示す。

温度変数	冶具温度を使用			基板温度を使用		
センサー	A	B	C	A	B	C
インダクタンス 1	2.141	-187.682	374384.199	2.300	-187.818	375361.246
インダクタンス 2	3.516	-114.060	439359.215	3.625	-115.584	439976.206
インダクタンス 3	2.628	-45.536	373465.407	2.793	-59.805	373931.712
インダクタンス 4	2.335	43.257	319916.214	2.505	19.965	320066.601

表 A.13　2006 年 3 月 12 日〜のデータの補正係数。

補正結果を図 A.27、図 A.28 に示す。

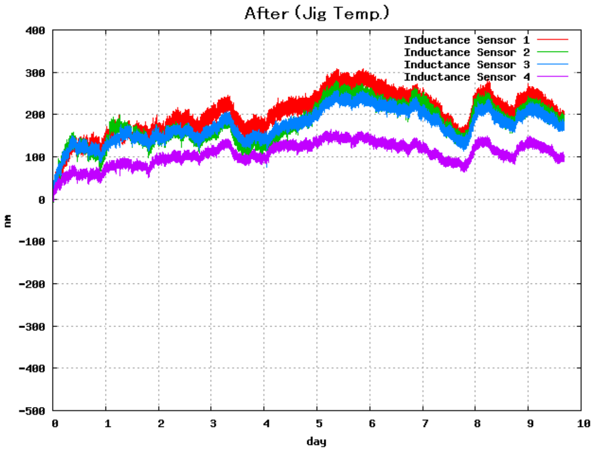


図 A.27　2006 年 3 月 12 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

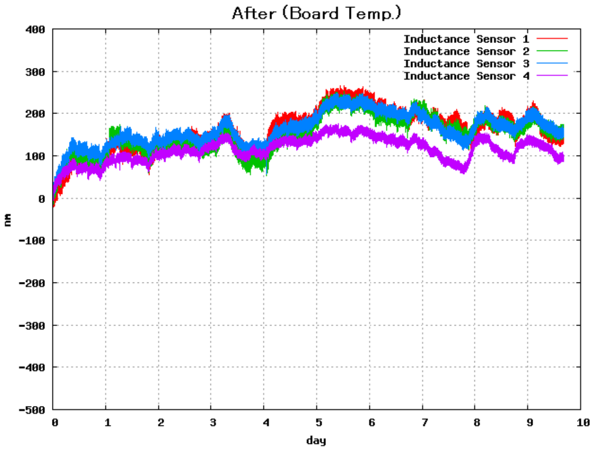


図 A.28　2006 年 3 月 12 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

安定性を表 A.14 に示す。

センサー	補正前	補正後 (冶具温度)	補正後 (基板温度)
インダクタンス 1	62.9 nm/week	49.9 nm/week	48.3 nm/week
インダクタンス 2	70.6 nm/week	45.6 nm/week	44.8 nm/week
インダクタンス 3	58.7 nm/week	39.2 nm/week	38.2 nm/week
インダクタンス 4	58.3 nm/week	27.6 nm/week	28.5 nm/week

表 A.14　2006 年 3 月 12 日〜のデータセットの安定性。小数点第 2 位を四捨五入してある。

■2006 年 3 月 25 日〜のデータ　測定結果を図 A.29 に示す。また、位置センサーの測定値の拡大図を図 A.30 に示す。

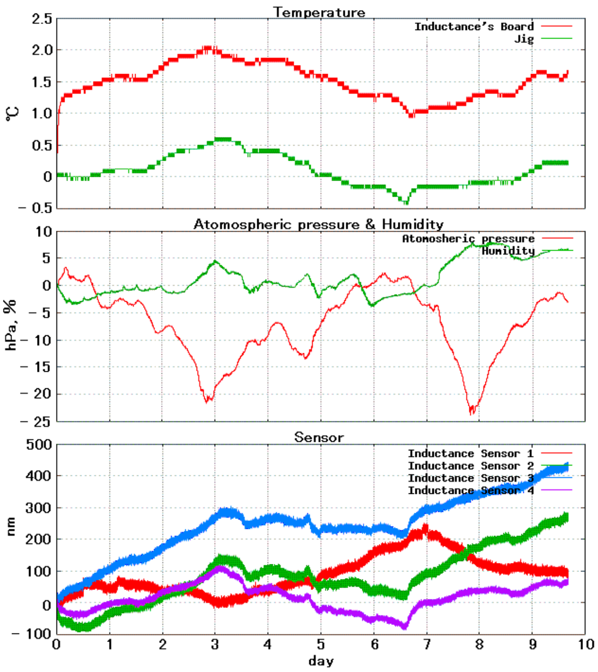


図 A.29　2006 年 3 月 25 日〜の測定結果。　上段赤：インダクタンスセンサーの基板の温度。　上段緑：冶具の温度。　中段赤：気圧。　中段緑：湿度。　下段赤〜紫：インダクタンスセンサーの測定値。いずれの値も測定開始時点の値からの増分を表している。

図 A.30　2006 年 3 月 25 日〜の補正する前のインダクタンスセンサーの測定値。

また、11 月 30 日〜のデータセットと同じように、水蒸気量と温度を変数に補正を行った。その補正係数を表 A.15 に示す。

温度変数	冶具温度を使用			基板温度を使用		
センサー	A	B	C	A	B	C
インダクタンス 1	0.707	-212.097	372244.197	0.403	-171.798	373.011369
インダクタンス 2	4.518	-42.498	439323.657	4.438	-26.536	439323.310
インダクタンス 3	4.548	-78.028	373964.577	4.394	-46.359	373917.785
インダクタンス 4	1.428	107.919	319181.066	1.602	79.491	318945.480

表 A.15　2006 年 3 月 25 日〜のデータの補正係数。

補正結果を図 A.31、図 A.32 に示す。

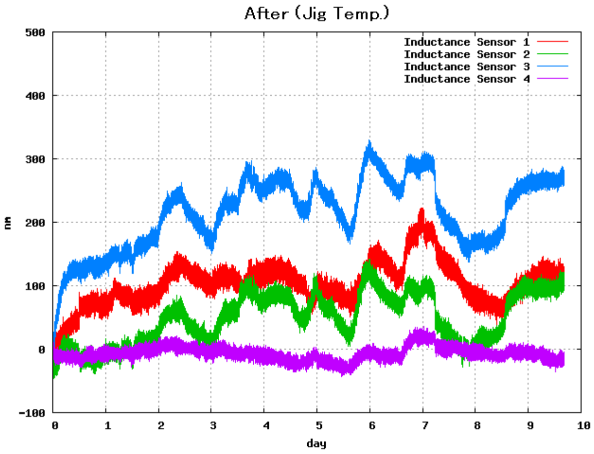


図 A.31　2006 年 3 月 25 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

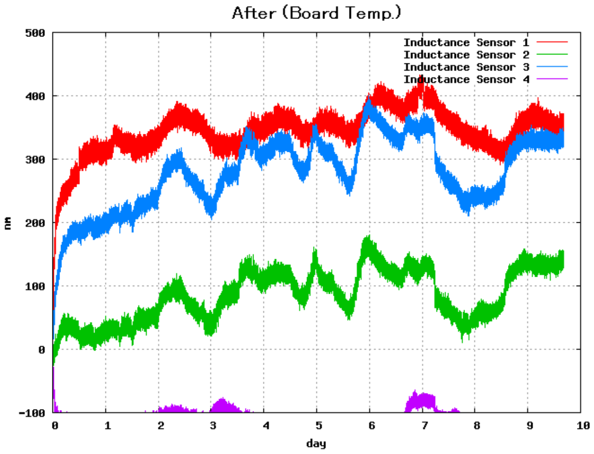


図 A.32　2006 年 3 月 25 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

安定性を表 A.16 に示す。

センサー	補正前	補正後 (治具温度)	補正後 (基板温度)
インダクタンス 1	60.5 nm/week	34.0 nm/week	37.2 nm/week
インダクタンス 2	86.4 nm/week	40.0 nm/week	40.5 nm/week
インダクタンス 3	95.0 nm/week	56.2 nm/week	57.7 nm/week
インダクタンス 4	41.7 nm/week	10.5 nm/week	16.5 nm/week

表 A.16　2006 年 3 月 25 日〜のデータセットの安定性。小数点第 2 位を四捨五入してある。

■2006 年 4 月 10 日〜のデータ　測定結果を図 A.33 に示す。また、位置センサーの測定値の拡大図を図 A.34 に示す。

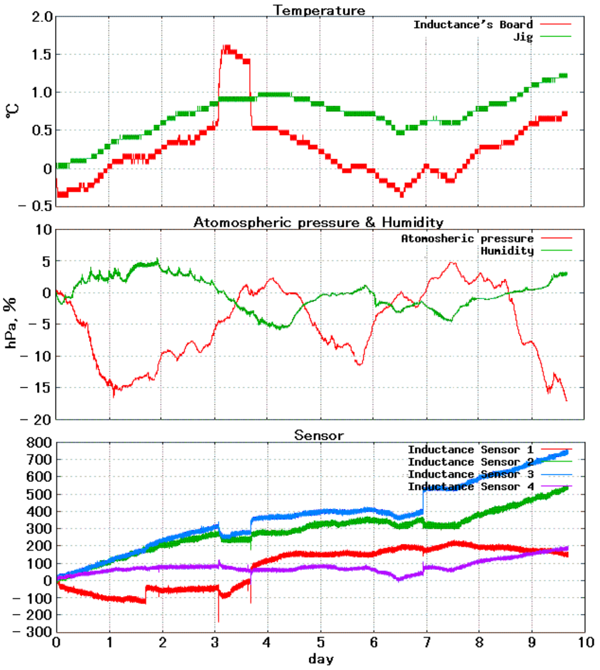


図 A.33　2006 年 4 月 10 日〜の測定結果。　上段赤：インダクタンスセンサーの基板の温度。　上段緑：冶具の温度。　中段赤：気圧。　中段緑：湿度。　下段赤〜紫：インダクタンスセンサーの測定値。いずれの値も測定開始時点の値からの増分を表している。

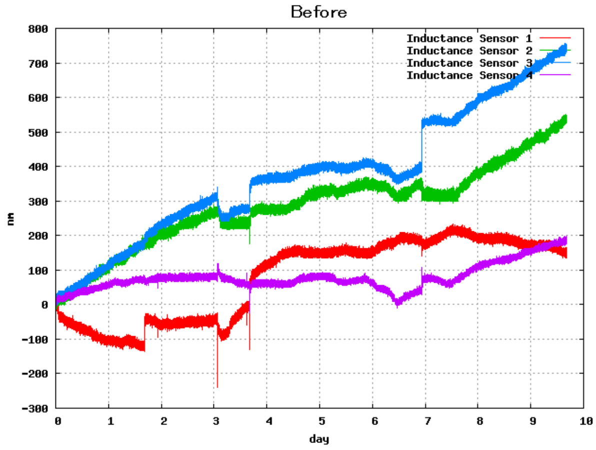


図 A.34　2006 年 4 月 10 日〜の補正する前のインダクタンスセンサーの測定値。

また、11 月 30 日〜のデータセットと同じように、水蒸気量と温度を変数に補正を行った。その補正係数を表 A.17 に示す。

温度変数	冶具温度を使用			基板温度を使用		
センサー	A	B	C	A	B	C
インダクタンス 1	-4.054	232.166	369509.777	-3.557	-6.808	372925.442
インダクタンス 2	-0.168	339.917	435244.146	0.054	72.515	438636.121
インダクタンス 3	-0.324	385.297	369340.302	-0.140	93.392	372966.731
インダクタンス 4	0.021	158.607	318483.965	0.160	27.958	320181.323

表 A.17　2006 年 4 月 10 日〜のデータの補正係数。

補正結果を図 A.35、図 A.36 に示す。

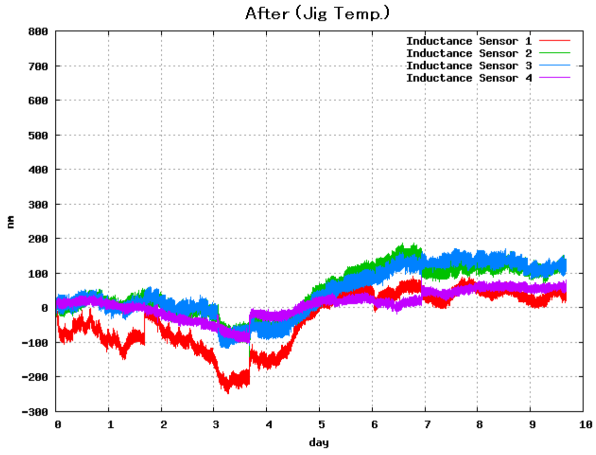


図 A.35　2006 年 4 月 10 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

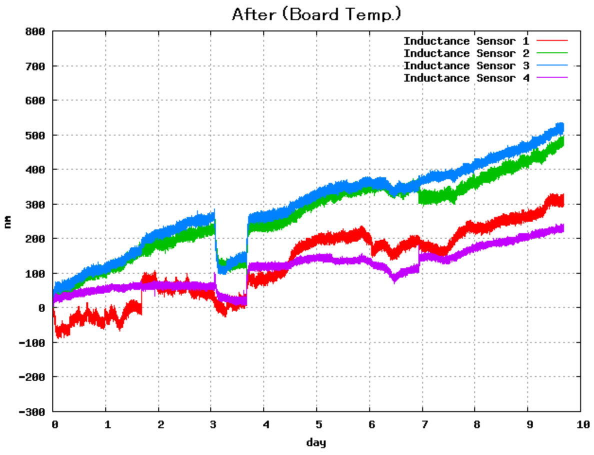


図 A.36　2006 年 4 月 10 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

安定性を表 A.18 に示す。

センサー	補正前	補正後 (冶具温度)	補正後 (基板温度)
インダクタンス 1	117.6 nm/week	70.1 nm/week	113.6 nm/week
インダクタンス 2	117.2 nm/week	83.0 nm/week	104.9 nm/week
インダクタンス 3	129.5 nm/week	73.1 nm/week	123.6 nm/week
インダクタンス 4	58.5 nm/week	38.3 nm/week	57.2 nm/week

表 A.18　2006 年 4 月 10 日〜のデータセットの安定性。小数点第 2 位を四捨五入してある。

■**2006 年 4 月 20 日〜のデータ**　測定結果を図 A.37 に示す。また、位置センサーの測定値の拡大図を図 A.38 に示す。

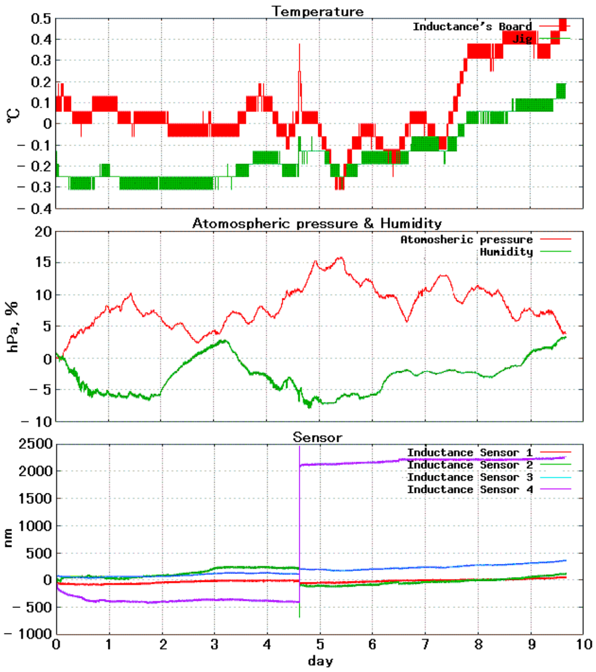


図 A.37　2006 年 4 月 20 日〜の測定結果。　上段赤：インダクタンスセンサーの基板の温度。　上段緑：冶具の温度。　中段赤：気圧。　中段緑：湿度。　下段赤〜紫：インダクタンスセンサーの測定値。いずれの値も測定開始時点の値からの増分を表している。

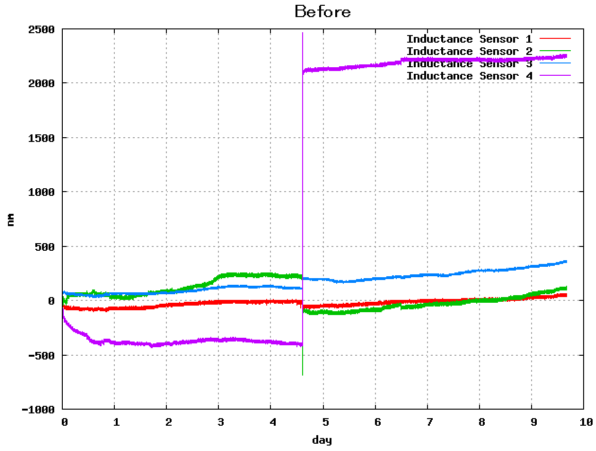


図 A.38　2006 年 4 月 20 日〜の補正する前のインダクタンスセンサーの測定値。

また、11 月 30 日〜のデータセットと同じように、水蒸気量と温度を変数に補正を行った。その補正係数を表 A.19 に示す。

温度変数	冶具温度を使用			基板温度を使用		
センサー	A	B	C	A	B	C
インダクタンス 1	0.322	331.571	368907.115	1.035	83.165	371982.165
インダクタンス 2	1.010	691.513	429962.465	2.448	182.924	436179.390
インダクタンス 3	-0.089	699.808	295636.357	1.116	233.556	300924.606
インダクタンス 4	1.259	122.848	375162.331	1.351	64.223	375609.657

表 A.19　2006 年 4 月 20 日〜のデータの補正係数。

補正結果を図 A.39、図 A.40 に示す。

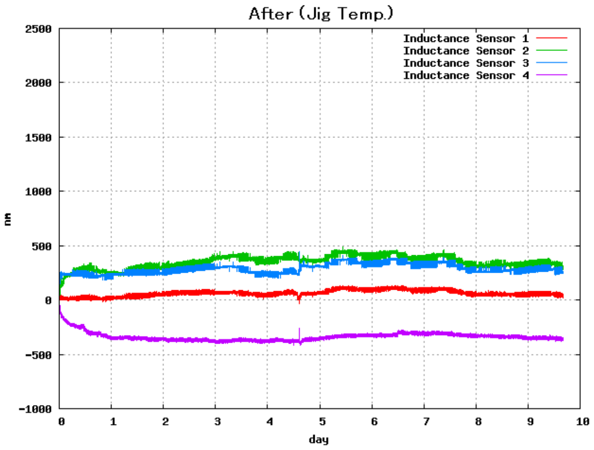


図 A.39　2006 年 4 月 20 日～の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

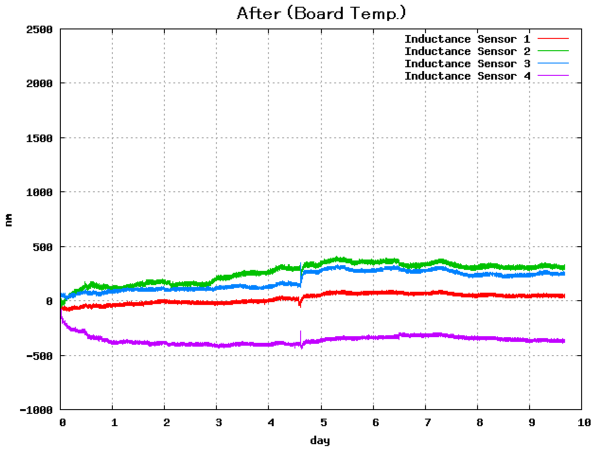


図 A.40　2006 年 4 月 20 日～の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

安定性を表 A.20 に示す。

センサー	補正前	補正後 (冶具温度)	補正後 (基板温度)
インダクタンス 1	115.2 nm/week	59.2 nm/week	93.9 nm/week
インダクタンス 2	53.5 nm/week	27.9 nm/week	44.9 nm/week
インダクタンス 3	100.2 nm/week	45.7 nm/week	84.1 nm/week
インダクタンス 4	51.7 nm/week	39.7 nm/week	40.9 nm/week

表 A.20　2006 年 4 月 20 日～のデータセットの安定性。小数点第 2 位を四捨五入してある。

■2006 年 5 月 25 日〜のデータ　測定結果を図 A.41 に示す。また、位置センサーの測定値の拡大図を図 A.42 に示す。

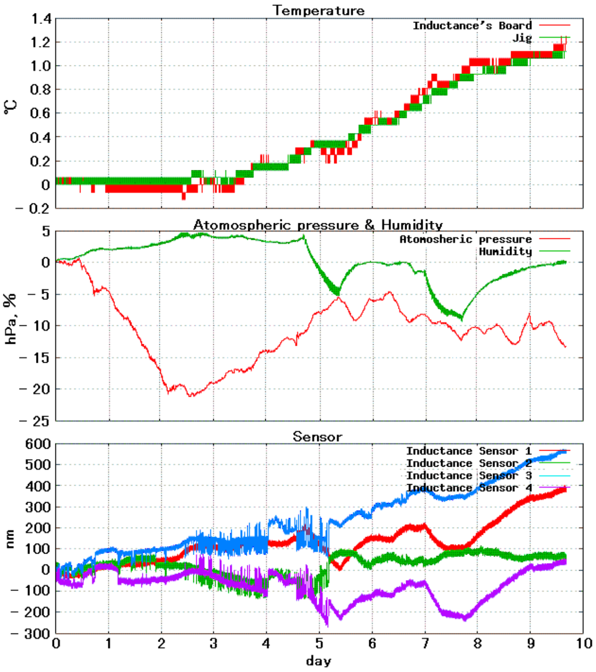


図 A.41　2006 年 5 月 25 日〜の測定結果。　上段赤：インダクタンスセンサーの基板の温度。　上段緑：冶具の温度。　中段赤：気圧。　中段緑：湿度。　下段赤〜紫：インダクタンスセンサーの測定値。いずれの値も測定開始時点の値からの増分を表している。

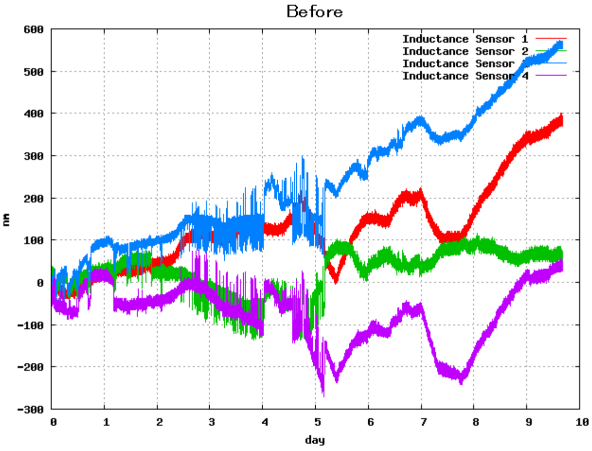


図 A.42　2006 年 5 月 25 日〜の補正する前のインダクタンスセンサーの測定値。

また、11 月 30 日〜のデータセットと同じように、水蒸気量と温度を変数に補正を行った。その補正係数を表 A.21 に示す。

温度変数	冶具温度を使用			基板温度を使用		
センサー	A	B	C	A	B	C
インダクタンス 1	2.961	264.810	366475.997	2.970	237.171	365402.935
インダクタンス 2	0.989	171.974	443620.867	0.972	151.254	443007.692
インダクタンス 3	2.809	194.753	308148.608	2.777	169.817	307498.702
インダクタンス 4	3.621	-452.503	385164.451	3.582	-408.158	387085.209

表 A.21　2006 年 5 月 25 日〜のデータの補正係数。

補正結果を図 A.43、図 A.44 に示す。

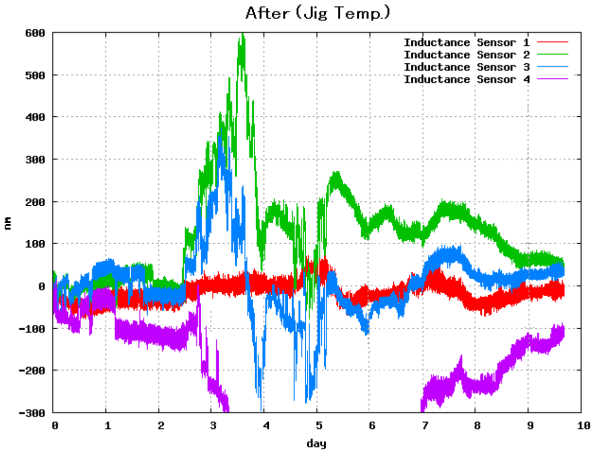


図 A.43　2006 年 5 月 25 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

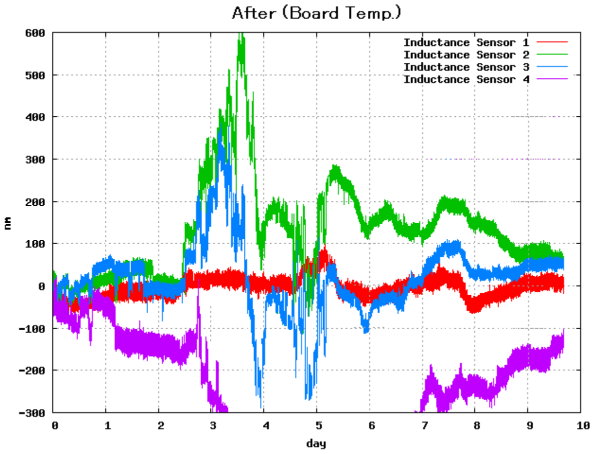


図 A.44　2006 年 5 月 25 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

安定性を表 A.22 に示す。

センサー	補正前	補正後 (治具温度)	補正後 (基板温度)
インダクタンス 1	99.1 nm/week	21.3 nm/week	23.1 nm/week
インダクタンス 2	132.0 nm/week	116.6 nm/week	117.3 nm/week
インダクタンス 3	114.9 nm/week	87.4 nm/week	89.1 nm/week
インダクタンス 4	280.2 nm/week	183.6 nm/week	183.3 nm/week

表 A.22　2006 年 5 月 25 日〜のデータセットの安定性。小数点第 2 位を四捨五入してある。

■**2006 年 6 月 5 日〜のデータ**　測定結果を図 A.45 に示す。また、位置センサーの測定値の拡大図を図 A.46 に示す。

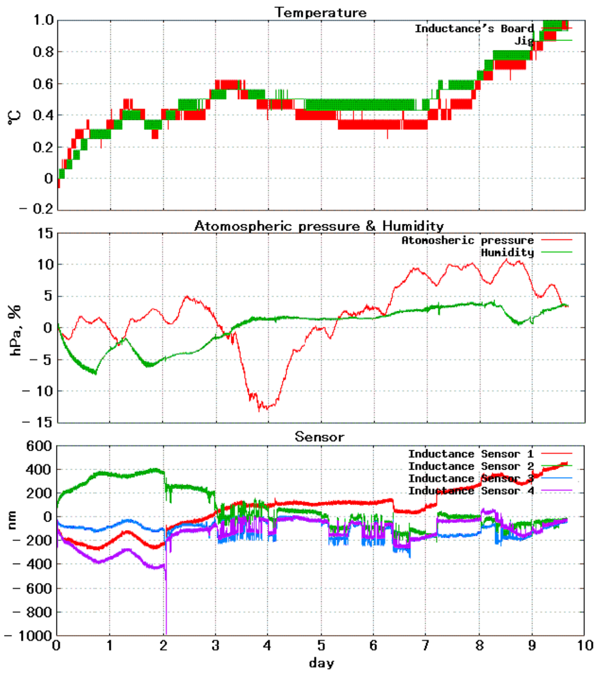


図 A.45　2006 年 6 月 5 日〜の測定結果。　上段赤：インダクタンスセンサーの基板の温度。　上段緑：治具の温度。　中段赤：気圧。　中段緑：湿度。　下段赤〜紫：インダクタンスセンサーの測定値。いずれの値も測定開始時点の値からの増分を表している。

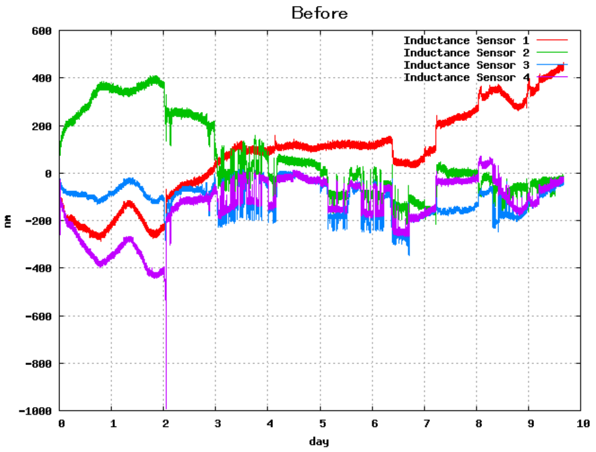


図 A.46　2006 年 6 月 5 日〜の補正する前のインダクタンスセンサーの測定値。

また、11 月 30 日〜のデータセットと同じように、水蒸気量と温度を変数に補正を行った。その補正係数を表 A.23 に示す。

温度変数	治具温度を使用			基板温度を使用		
センサー	A	B	C	A	B	C
インダクタンス 1	2.746	395.097	364165.140	3.407	354.960	362239.633
インダクタンス 2	-4.274	-26.000	449136.598	-4.357	-11.856	448969.196
インダクタンス 3	-8.432	-554.556	329890.918	-9.531	-448.401	331319.697
インダクタンス 4	-2.729	619.839	392786.700	-3.981	-494.619	394215.714

表 A.23　2006 年 6 月 5 日〜のデータの補正係数。

補正結果を図 A.47、図 A.48 に示す。

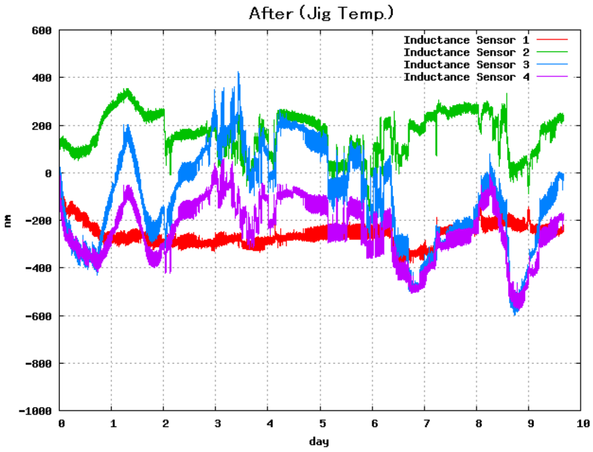


図 A.47　2006 年 6 月 5 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

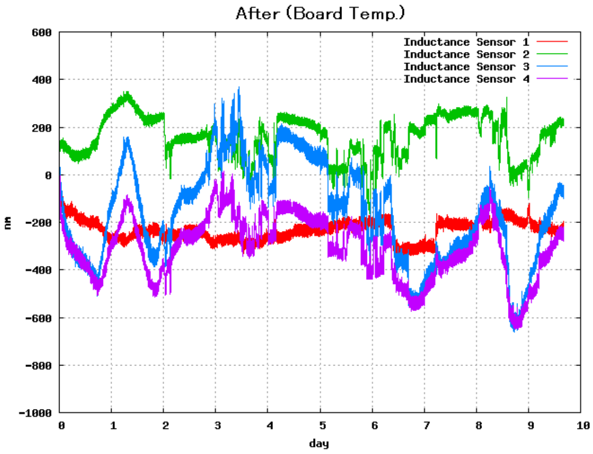


図 A.48　2006 年 6 月 5 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

安定性を表 A.24 に示す。

センサー	補正前	補正後 (冶具温度)	補正後 (基板温度)
インダクタンス 1	153.4 nm/week	44.0 nm/week	41.8 nm/week
インダクタンス 2	158.2 nm/week	88.3 nm/week	88.4 nm/week
インダクタンス 3	395.4 nm/week	205.6 nm/week	207.2 nm/week
インダクタンス 4	225.4 nm/week	125.7 nm/week	129.4 nm/week

表 A.24　2006 年 6 月 5 日〜のデータセットの安定性。小数点第 2 位を四捨五入してある。

■2006 年 6 月 20 日〜のデータ　測定結果を図 A.49 に示す。また、位置センサーの測定値の拡大図を図 A.50 に示す。

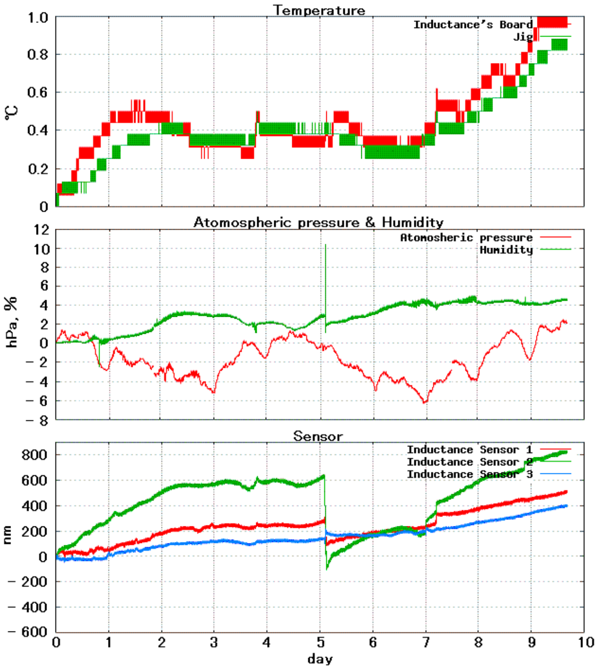


図 A.49　2006 年 6 月 20 日〜の測定結果。　上段赤：インダクタンスセンサーの基板の温度。　上段緑：治具の温度。　中段赤：気圧。　中段緑：湿度。　下段赤〜青：インダクタンスセンサーの測定値。いずれの値も測定開始時点の値からの増分を表している。

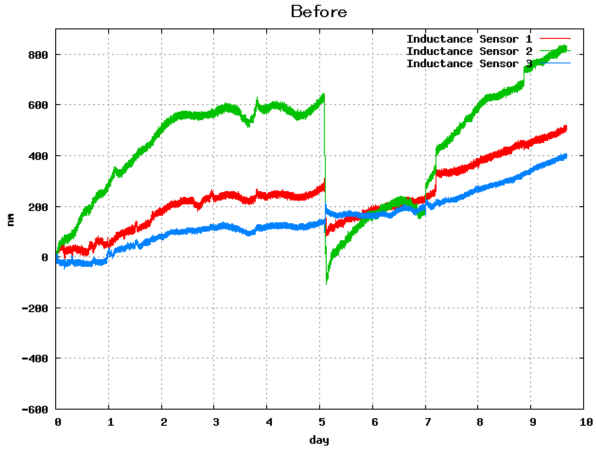


図 A.50　2006 年 6 月 20 日〜の補正する前のインダクタンスセンサーの測定値。

また、11 月 30 日〜のデータセットと同じように、水蒸気量と温度を変数に補正を行った。その補正係数を表 A.25 に示す。

温度変数	治具温度を使用			基板温度を使用		
センサー	A	B	C	A	B	C
インダクタンス 1	4.154	319.038	367962.229	5.366	152.869	369745.117
インダクタンス 2	-2.122	1210.573	412851.367	2.927	526.213	420872.427
インダクタンス 3	4.645	156.493	317543.913	4.959	108.346	318640.218

表 A.25　2006 年 6 月 20 日〜のデータの補正係数。

補正結果を図 A.51、図 A.52 に示す。

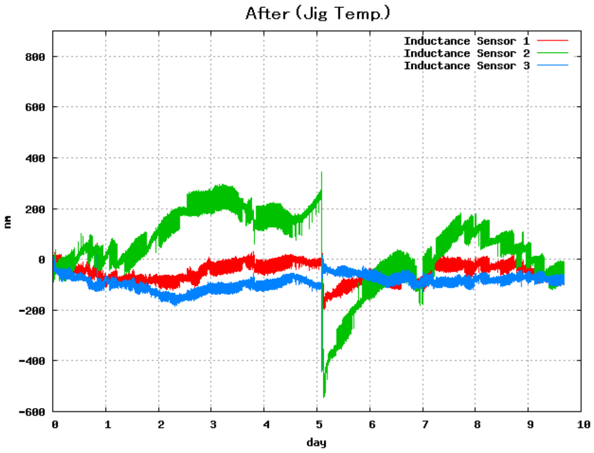


図 A.51　2006 年 6 月 20 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

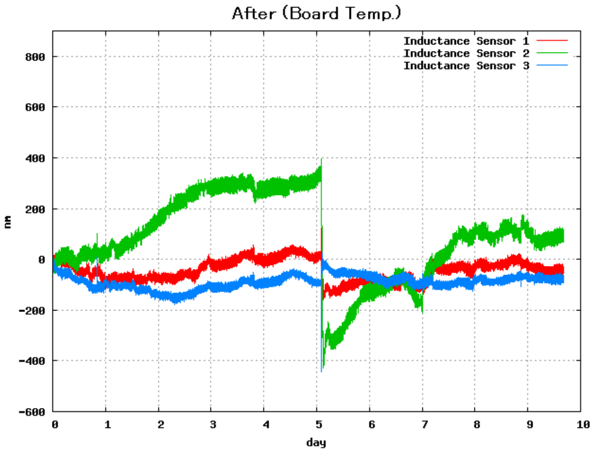


図 A.52　2006 年 6 月 20 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

安定性を表 A.26 に示す。

センサー	補正前	補正後 (冶具温度)	補正後 (基板温度)
インダクタンス 1	123.9 nm/week	36.1 nm/week	41.0 nm/week
インダクタンス 2	220.9 nm/week	145.0 nm/week	166.7 nm/week
インダクタンス 3	106.1 nm/week	27.1 nm/week	26.9 nm/week

表 A.26　2006 年 6 月 20 日〜のデータセットの安定性。小数点第 2 位を四捨五入してある。

■2006 年 7 月 10 日〜のデータ　測定結果を図 A.53 に示す。また、位置センサーの測定値の拡大図を図 A.54 に示す。

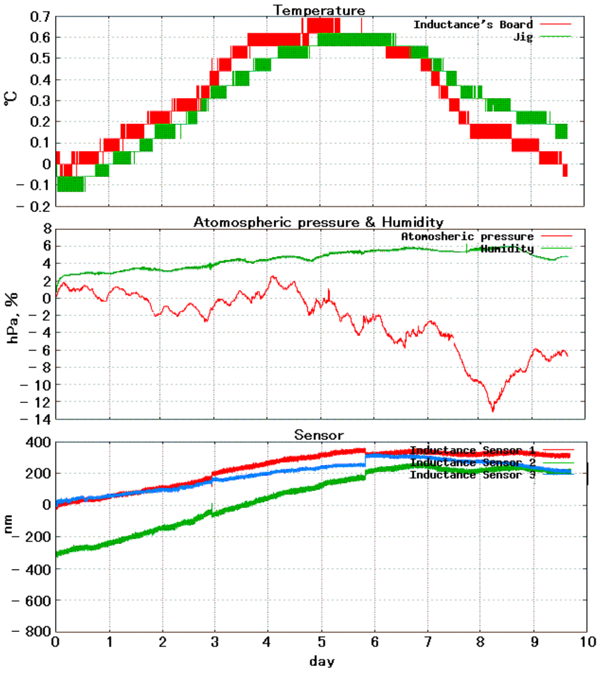


図 A.53　2006 年 7 月 10 日〜の測定結果。　上段赤：インダクタンスセンサーの基板の温度。　上段緑：冶具の温度。　中段赤：気圧。　中段緑：湿度。　下段赤〜青：インダクタンスセンサーの測定値。いずれの値も測定開始時点の値からの増分を表している。

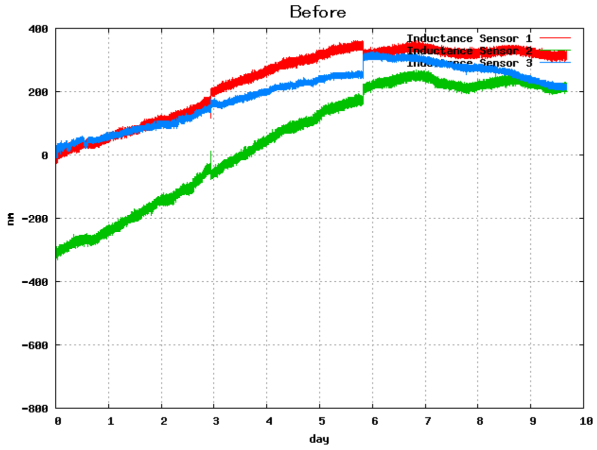


図 A.54　2006 年 7 月 10 日〜の補正する前のインダクタンスセンサーの測定値。

また、11 月 30 日〜のデータセットと同じように、水蒸気量と温度を変数に補正を行った。その補正係数を表 A.27 に示す。

温度変数	冶具温度を使用			基板温度を使用		
センサー	A	B	C	A	B	C
インダクタンス 1	6.751	-210.762	374647.555	5.572	-125.034	374421.540
インダクタンス 2	16.652	-722.837	449061.103	12.345	-397.906	447542.346
インダクタンス 3	3.929	-3.036	317721.648	3.971	-8.797	317886.682

表 A.27　2006 年 7 月 10 日〜のデータの補正係数。

補正結果を図 A.55、図 A.56 に示す。

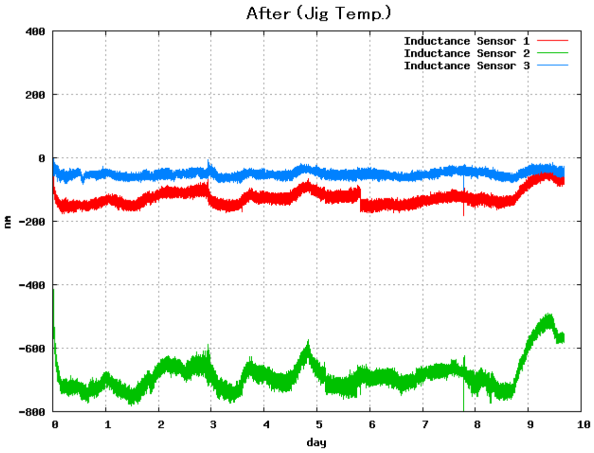


図 A.55　2006 年 7 月 10 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

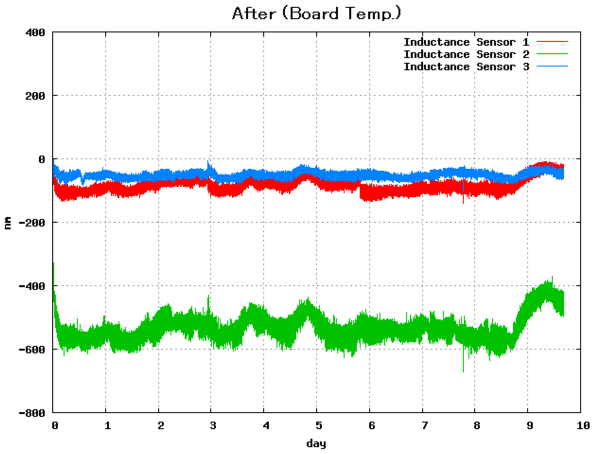


図 A.56　2006 年 7 月 10 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

安定性を表 A.28 に示す。

センサー	補正前	補正後 (冶具温度)	補正後 (基板温度)
インダクタンス 1	88.8 nm/week	24.2 nm/week	20.9 nm/week
インダクタンス 2	183.2 nm/week	51.2 nm/week	39.3 nm/week
インダクタンス 3	73.1 nm/week	9.5 nm/week	9.4 nm/week

表 A.28　2006 年 7 月 10 日〜のデータセットの安定性。小数点第 2 位を四捨五入してある。

■2006 年 7 月 26 日〜のデータ　測定結果を図 A.57 に示す。また、位置センサーの測定値の拡大図を図 A.58 に示す。

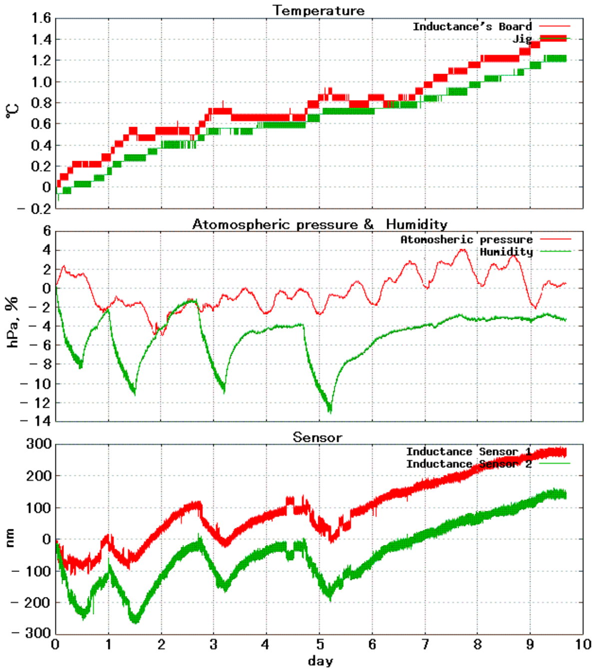


図 A.57　2006 年 7 月 26 日〜の測定結果。　上段赤：インダクタンスセンサーの基板の温度。　上段緑：治具の温度。　中段赤：気圧。　中段緑：湿度。　下段赤、緑：インダクタンスセンサーの測定値。いずれの値も測定開始時点の値からの増分を表している。

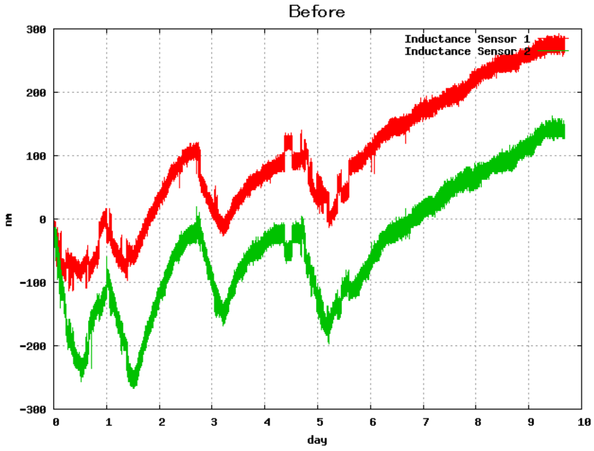


図 A.58　2006 年 7 月 26 日〜の補正する前のインダクタンスセンサーの測定値。

また、11 月 30 日〜のデータセットと同じように、水蒸気量と温度を変数に補正を行った。その補正係数を表 A.29 に示す。

温度変数	治具温度を使用			基板温度を使用		
センサー	A	B	C	A	B	C
インダクタンス 1	1.012	111.556	372813.831	1.122	95.122	372469.975
インダクタンス 2	1.810	188.619	439220.207	1.906	174.876	438261.044

表 A.29　2006 年 7 月 26 日〜のデータの補正係数。

補正結果を図 A.59、図 A.60 に示す。

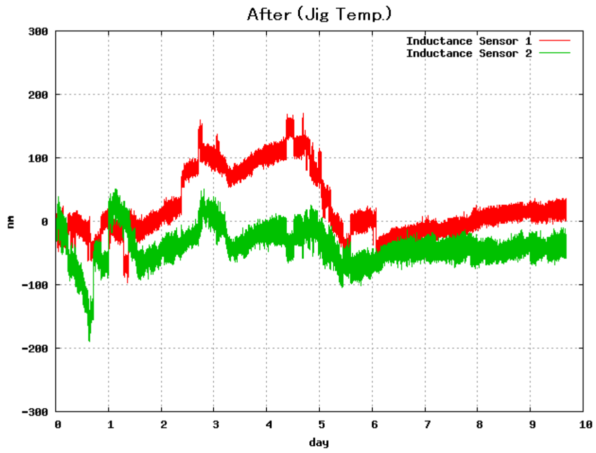


図 A.59　2006 年 7 月 26 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

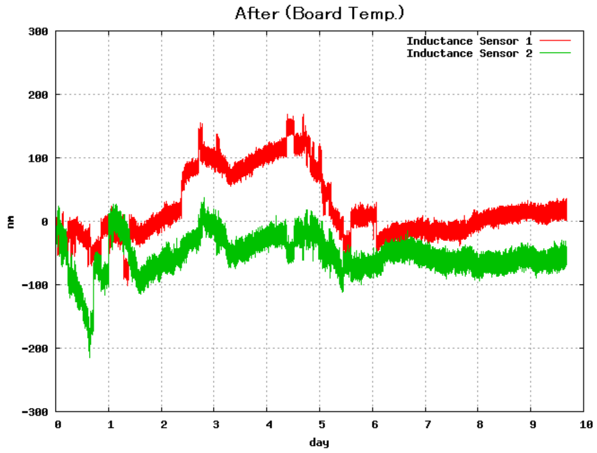


図 A.60　2006 年 7 月 26 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

安定性を表 A.30 に示す。

センサー	補正前	補正後 (冶具温度)	補正後 (基板温度)
インダクタンス 1	80.7 nm/week	50.6 nm/week	51.9 nm/week
インダクタンス 2	112.7 nm/week	27.8 nm/week	28.9 nm/week

表 A.30　2006 年 7 月 26 日〜のデータセットの安定性。小数点第 2 位を四捨五入してある。

■2006 年 8 月 9 日〜のデータ　測定結果を図 A.61 に示す。また、位置センサーの測定値の拡大図を図 A.62 に示す。

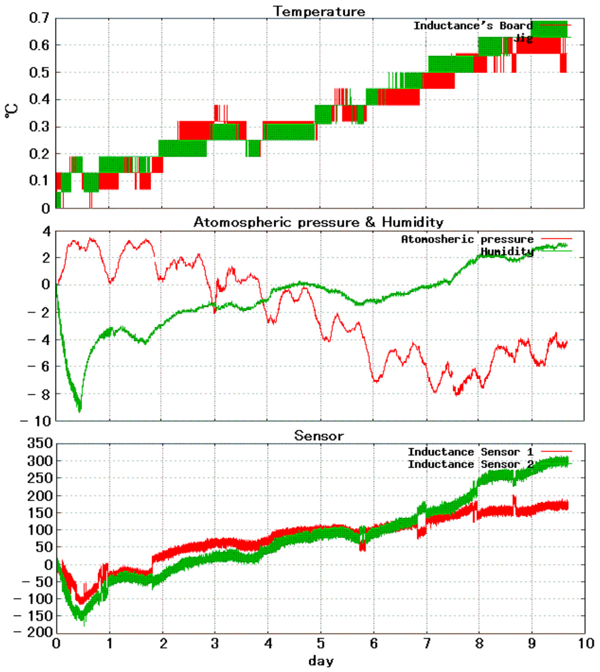


図 A.61　2006 年 8 月 9 日〜の測定結果。　上段赤：インダクタンスセンサーの基板の温度。　上段緑：治具の温度。　中段赤：気圧。　中段緑：湿度。　下段赤、緑：インダクタンスセンサーの測定値。いずれの値も測定開始時点の値からの増分を表している。

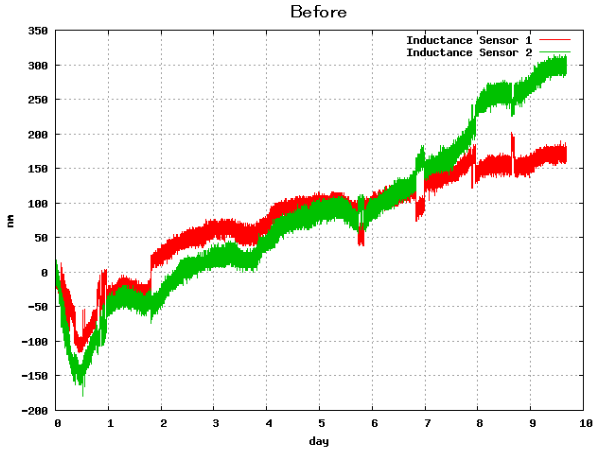


図 A.62　2006 年 8 月 9 日〜の補正する前のインダクタンスセンサーの測定値。

また、11 月 30 日〜のデータセットと同じように、水蒸気量と温度を変数に補正を行った。その補正係数を表 A.31 に示す。

温度変数	冶具温度を使用			基板温度を使用		
センサー	A	B	C	A	B	C
インダクタンス 1	2.130	-230.471	380996.289	1.427	-85.587	378368.727
インダクタンス 2	1.492	361.878	434879.480	1.779	325.225	433314.306

表 A.31　2006 年 8 月 9 日〜のデータの補正係数。

補正結果を図 A.63、図 A.64 に示す。

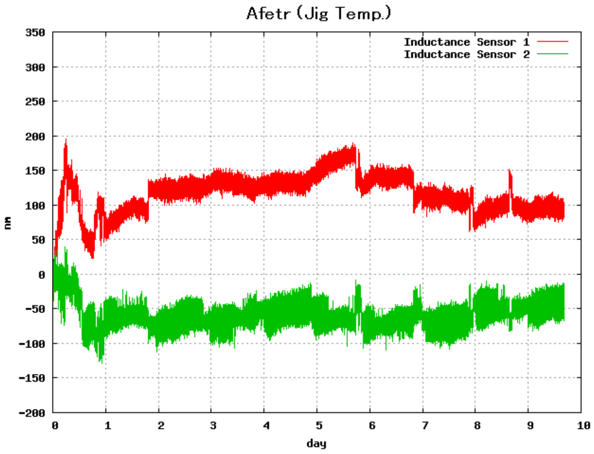


図 A.63　2006 年 8 月 9 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

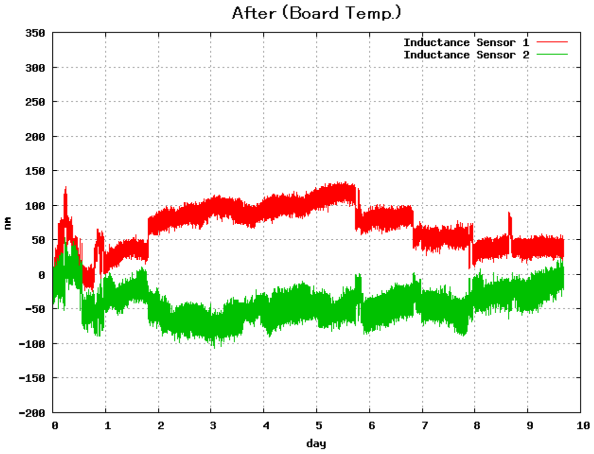


図 A.64　2006 年 8 月 9 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

安定性を表 A.32 に示す。

センサー	補正前	補正後 (冶具温度)	補正後 (基板温度)
インダクタンス 1	48.2 nm/week	27.1 nm/week	30.8 nm/week
インダクタンス 2	113.8 nm/week	17.9 nm/week	22.1 nm/week

表 A.32　2006 年 8 月 9 日〜のデータセットの安定性。小数点第 2 位を四捨五入してある。

■2006 年 8 月 21 日〜のデータ　測定結果を図 A.65 に示す。また、位置センサーの測定値の拡大図を図 A.66 に示す。

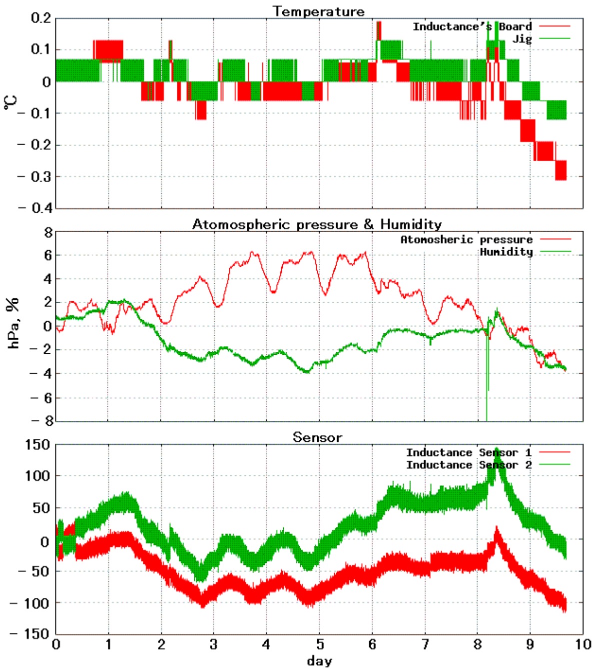


図 A.65　2006 年 8 月 21 日〜の測定結果。　上段赤：インダクタンスセンサーの基板の温度。　上段緑：冶具の温度。　中段赤：気圧。　中段緑：湿度。　下段赤、緑：インダクタンスセンサーの測定値。いずれの値も測定開始時点の値からの増分を表している。

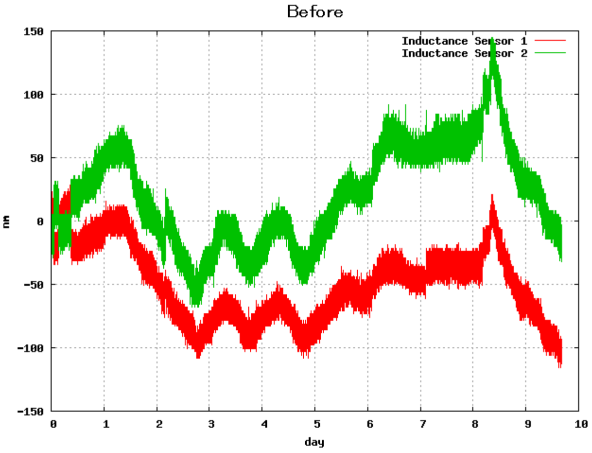


図 A.66　2006 年 8 月 21 日〜の補正する前のインダクタンスセンサーの測定値。

また、11 月 30 日〜のデータセットと同じように、水蒸気量と温度を変数に補正を行った。その補正係数を表 A.33 に示す。

温度変数	冶具温度を使用			基板温度を使用		
センサー	A	B	C	A	B	C
インダクタンス 1	1.266	35.365	374637.912	1.345	-11.141	375894.615
インダクタンス 2	1.998	-55.501	445540.584	2.536	-277.173	452933.039

表 A.33　2006 年 8 月 21 日〜のデータの補正係数。

補正結果を図 A.67、図 A.68 に示す。

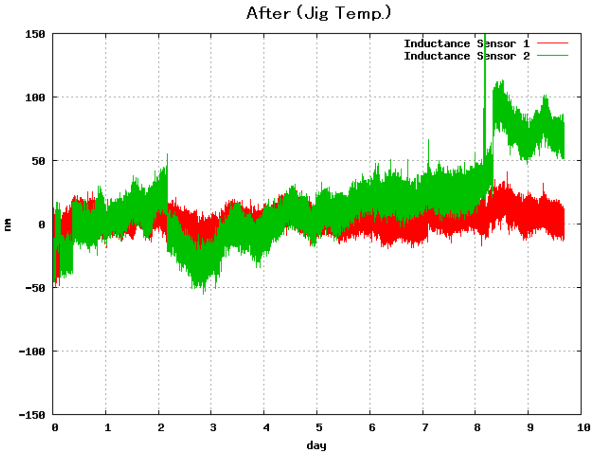


図 A.67　2006 年 8 月 21 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

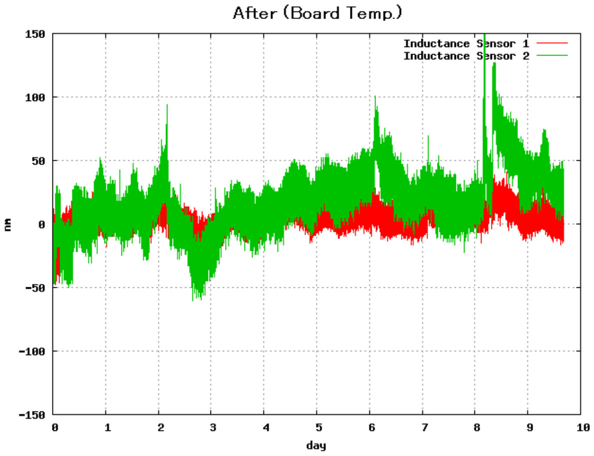


図 A.68　2006 年 8 月 21 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

安定性を表 A.34 に示す。

センサー	補正前	補正後 (冶具温度)	補正後 (基板温度)
インダクタンス 1	27.1 nm/week	8.4 nm/week	8.5 nm/week
インダクタンス 2	48.0 nm/week	30.0 nm/week	23.6 nm/week

表 A.34　2006 年 8 月 21 日〜のデータセットの安定性。小数点第 2 位を四捨五入してある。

■**2006 年 8 月 31 日〜のデータ**　測定結果を図 A.69 に示す。また、位置センサーの測定値の拡大図を図 A.70 に示す。

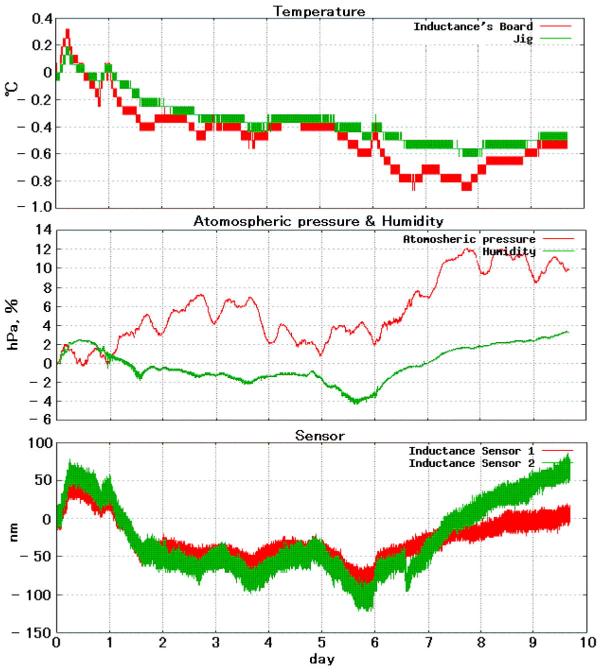


図 A.69　2006 年 8 月 31 日〜の測定結果。　上段赤：インダクタンスセンサーの基板の温度。　上段緑：冶具の温度。　中段赤：気圧。　中段緑：湿度。　下段赤、緑：インダクタンスセンサーの測定値。いずれの値も測定開始時点の値からの増分を表している。

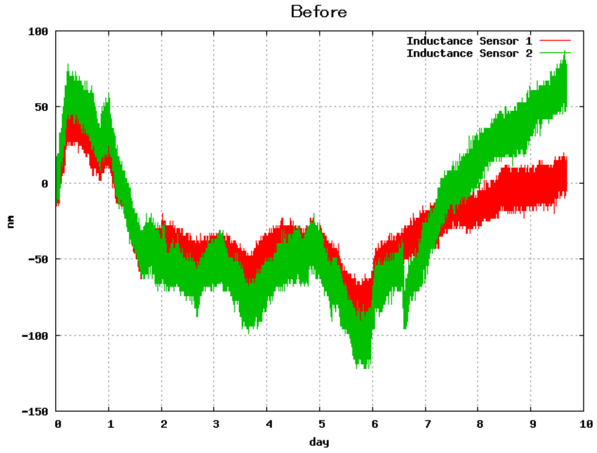


図 A.70　2006 年 8 月 31 日〜の補正する前のインダクタンスセンサーの測定値。

また、11 月 30 日〜のデータセットと同じように、水蒸気量と温度を変数に補正を行った。その補正係数を表 A.35 に示す。

温度変数	冶具温度を使用			基板温度を使用		
センサー	A	B	C	A	B	C
インダクタンス 1	1.188	7.655	375406.531	1.186	6.589	375392.461
インダクタンス 2	2.146	-54.354	445436.556	2.105	-30.731	445052.967

表 A.35　2006 年 8 月 31 日〜のデータの補正係数。

補正結果を図 A.71、図 A.72 に示す。

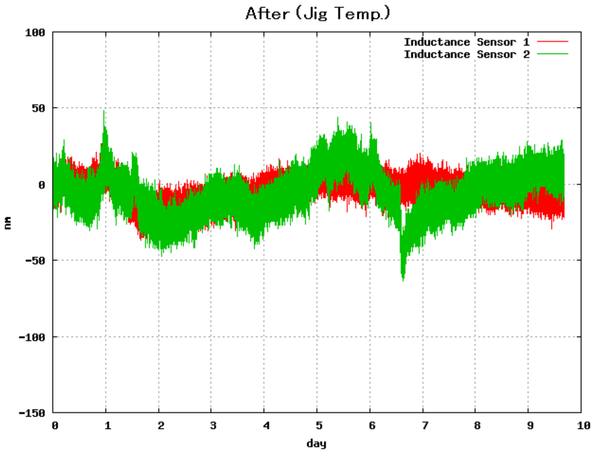


図 A.71　2006 年 8 月 31 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

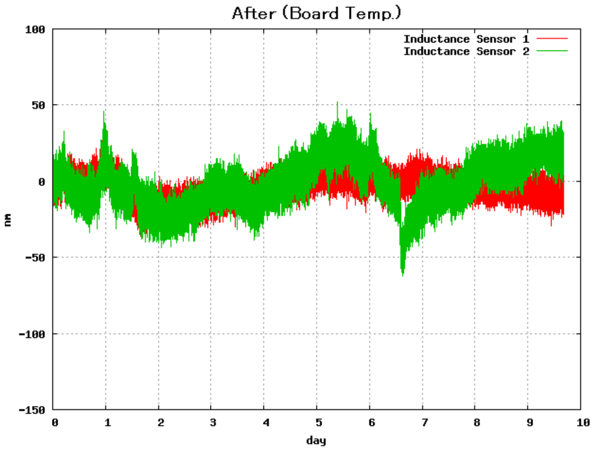


図 A.72　2006 年 8 月 31 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

安定性を表 A.36 に示す。

センサー	補正前	補正後 (治具温度)	補正後 (基板温度)
インダクタンス 1	28.4 nm/week	8.0 nm/week	8.0 nm/week
インダクタンス 2	48.0 nm/week	14.3 nm/week	15.5 nm/week

表 A.36　2006 年 8 月 31 日〜のデータセットの安定性。小数点第 2 位を四捨五入してある。

■**2006 年 9 月 15 日〜のデータ**　測定結果を図 A.73 に示す。また、位置センサーの測定値の拡大図を図 A.74 に示す。

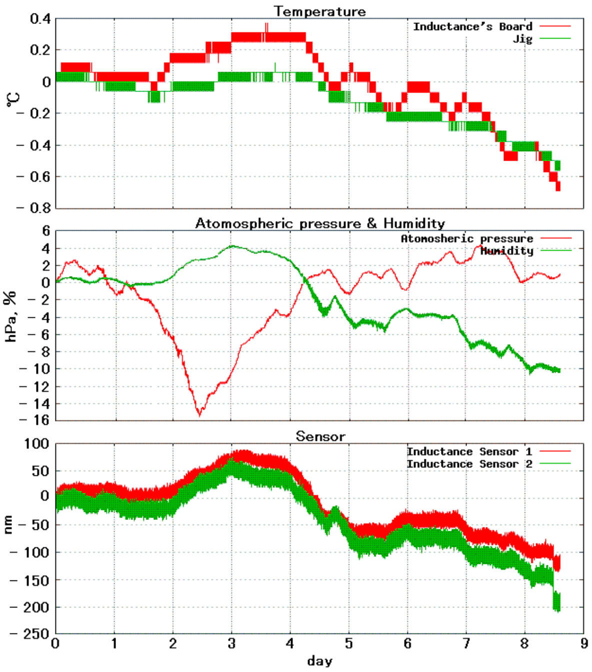


図 A.73　2006 年 9 月 15 日〜の測定結果。　上段赤：インダクタンスセンサーの基板の温度。　上段緑：冶具の温度。　中段赤：気圧。　中段緑：湿度。　下段赤、緑：インダクタンスセンサーの測定値。いずれの値も測定開始時点の値からの増分を表している。

図 A.74　2006 年 9 月 15 日〜の補正する前のインダクタンスセンサーの測定値。

また、11 月 30 日〜のデータセットと同じように、水蒸気量と温度を変数に補正を行った。その補正係数を表 A.37 に示す。

温度変数	冶具温度を使用			基板温度を使用		
センサー	A	B	C	A	B	C
インダクタンス 1	1.276	-85.578	377567.705	1.076	-12.010	375928.009
インダクタンス 2	1.192	-24.326	446228.353	1.148	-6.407	445848.460

表 A.37　2006 年 9 月 15 日〜のデータの補正係数。

補正結果を図 A.75、図 A.76 に示す。

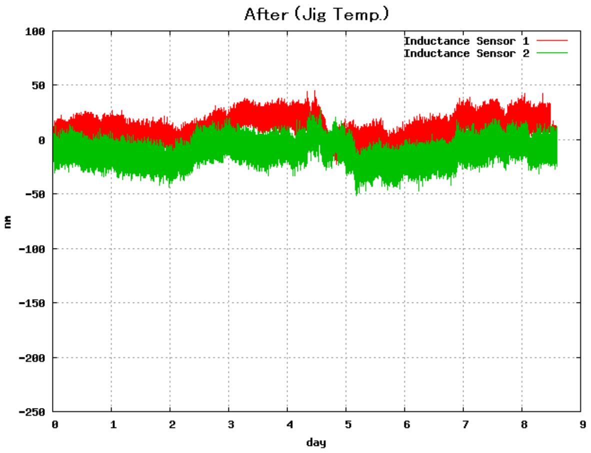


図 A.75　2006 年 9 月 15 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

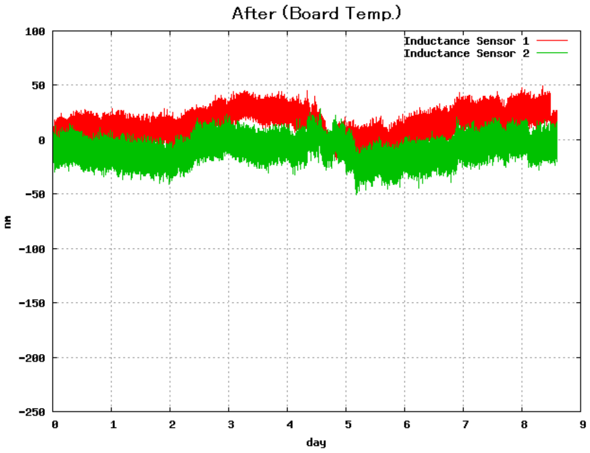


図 A.76　2006 年 9 月 15 日〜の水蒸気量と基板温度で補正した後のインダクタンスセンサーの測定値。

安定性を表 A.38 に示す。

センサー	補正前	補正後 (治具温度)	補正後 (基板温度)
インダクタンス 1	53.0 nm/week	10.4 nm/week	11.2 nm/week
インダクタンス 2	57.4 nm/week	9.5 nm/week	9.6 nm/week

表 A.38　2006 年 9 月 15 日〜のデータセットの安定性。小数点第 2 位を四捨五入してある。

参考文献

[1] Jerry Nelson et al. **"TMT Status Report"** *2006 SPIE 6267 60*

[2] Uemura et al. **"Outburst and Post-Outburst Active Phase of the Black Hole X-Ray Binary V4641 Sagittarii in 2002"** *2004 PASJ Vol56, No.SP1, pp.S61-S75*

[3] "http://www.phys.lsu.edu/ rih/"

[4] "http://loke.as.arizona.edu/ ckulesa/research/infraredH2.html"

[5] 山下泰正 **"反射望遠鏡"** *1992* **東京大学出版会**

[6] Terry Mast et al. **"Edge Sensor Design for the TMT"** *2006 SPIE 6267 76*

[7] "http://www.bluelineengineering.com/Differential%20Edge%20Sensors.html"

[8] "http://www.techno-system.co.jp/seiden.htm"

[9] "http://www.sigma-koki.com/D/SigmaFineStage/Guide/DigitalSensor/DigitalSensor.html"

[10] **"月間「省エネルギー」2002 年 9 月号"** *2002* **省エネルギーセンター**

[11] 伊東章 **"「化学工学基礎」講義資料"** **新潟大学工学部**