# TAMA プロジェクト 現状報告書

TAMA STATUS REPORT 99

# 1999年7月





国立天文台三鷹キャンパスに建設中の TAMA300

中央真空槽室の内部の様子





地下通路に設置された全長300mのレーザービーム用真空パイプ

ミラー懸架システムと 300m 真空パイプ



TAMA は今や,かつてない感度で重力波の観測を開始しようとしている.これからの数年で欧米の大型レー ザー干渉計も完成し,世界的なネットワークの中で重力波観測が始まろうとしているが,日本の TAMA300 重力波検出器は世界に先駆けて未踏の地を拓こうとしている.この TAMA 現状報告書は,そのようなエキサ イティングな時期に書かれたものであり,TAMA に関わる研究者の意気込みが伝わることを願っている.実 際この報告書は,直接 TAMA の研究を分担している研究者に原稿の執筆を依頼し,それを集めて編集したも のである.この報告書によって,TAMA の概要と現状が少しでも理解していただければ幸いである.

> 1999年7月 編集:坪野公夫 tsubono@phys.s.u-tokyo.ac.jp

# 目 次

第1章	TAMA プロジェクト	1
1.1	TAMA の概要	1
	1.1.1 TAMA の概念	1
	1.1.2 TAMA の概略	1
19		5
1.2		5
		0 0
	1.2.2 IAMA 0現状	0
答っ卉		0
<b>弗2</b> 草	TAMA300レーサーキ渉計の開発と現状	8
2.1	TAMA300の構成	8
2.2	TAMA300 の光学系	8
	2.2.1 光学要素の配置	9
2.3	TAMA300の制御	11
	2.3.1 差動光路長制御系	11
		12
	2.6.2 1/2013/11	13
9.4		10
2.4		10
~ ~	$2.4.1$ $\mathfrak{M}$ $\mathfrak{M}$ $\mathcal{A}$ $\mathcal{F}$ $\mathcal{A}$ $\mathcal{A}$ $\mathcal{A}$ $\mathcal{F}$ $\mathcal{A}$	14
2.5	アラインメント制御	15
2.6	TAMA300 の現状	18
第3章	TAMA300 検出器の要素技術	<b>20</b>
3.1	レーザー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	20
	3.1.1 はじめに	20
	3.1.2 光源に要求される性能	20
	3.1.3 注入同期型 Nd:YAG レーザー	20
	$314$ $\nu$ $\pi$ $\pi$ $\sigma$ $\sigma$ $\sigma$ $\sigma$ $\sigma$	21
	315 = 2 M	21
2.0	5.1.9 acm	20 95
3.2		20
		25
	3.2.2 基极四份磨	26
	3.2.3 コーティング	26
	3.2.4 ミラー損失の測定	29
	3.2.5 むすび	34
3.3	光学要素	36
	3.3.1 光検出器	36
	3.3.2 雷気光学結晶	36
3.4		38
0.4	し 「ノク ノ ·································	20
	- 0.4.1 - 10.女	- 00 - 00
	3.4.2 2調透過空モートクリーナーの開光	38
		38
	3.4.4 JIXXDIXA	39
	3.4.5 強度ノイズ除去の実験	40
	3.4.6 ドリフトに対する考察	43
	3.4.7 結論	43
3.5	鏡懸架システム	44
0.0	351 はじめに	44
	3.5.2 懸空システムの概要	11
	0.0.4 心ホノハノムVM女 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	44
	0.0.0 助作版によるは能計画	40
	3.5.4 IAMA 用憖栄ンステムの裂作	48
	3.5.5 まとゆ	-49

	36	防垢	5
	0.0	אוננען	
		3.6.1	- 構成
		362	防振特性 54
		0.0.2	
		3.6.3	安定性
	3.7	干洗計	制御のおおおおおおおおおおおおおおおおおおおおおおおおおおおおおおおおおおおお
	0.1	0 7 1	
		3.7.1	- 光路長制御
		379	アラインメント制御 65
		<u> </u>	
	3.8	テータ	取得システム
		381	
		0.0.1	
		3.8.2	低速テータ取得システム
	3.0	百穴	7(
	0.3	兵工	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
		3.9.1	構成
		202	$l^{\prime}$ $$ $+ - $ $$ $$ $$ $7$
		3.9.2	$(1) = (2) \times (1) $
	3.10	施設	
**	. +++		
第	4 草	重刀波	(源とテータ解析 77
	11	予相さ	<b>カ</b> ス重力波派
	4.1	1, 12 C	$103\pm7$ $Mm$
		4.1.1	- 重刀波の源
		119	TAMA300 け重力波を検出するか? 7'
		4.1.2	
		4.1.3	連星甲性子星の合体 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
		414	招新見爆発と重力法 70
		4.1.4	
		4.1.5	重力波の源の天球上での位置は1台の干渉計で決まるか? ....................................
	19	TAMA	の 咸 府 7 ペクト ラ / 子相 900 000 000 000 000 000 000 000 000 00
	4.4	IAMA	
	4.3	連星合	体による重力波
		4 2 1	油ジ・フペクトラム予想 のない シング
		4.0.1	
		4.3.2	Monte-Carlo 法による信号シミュレーション
		122	Matched Filter
		4.0.0	
		4.3.4	計算リソース
		125	Posempling 9
		4))	
	4.4	時刻精	iesamphing ····································
	4.4	時刻精	iesamphing ····································
∽	4.4	時刻精	icisamping ····································
第	4.4 5 章	時刻精 TAM	Resampling · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
第	4.4 5章 51	時刻精 TAM 300mF	Testamping ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
第	4.4 <b>5 章</b> 5.1	時刻精 TAM 300mF	渡と重力波源の方向決定精度       8         Aの応用研究と R&D       8         P 共振器をもちいた絶対長測定実験       8
第	4.4 <b>5 章</b> 5.1	時刻精 TAM 300mF 5.1.1	渡と重力波源の方向決定精度       85         A の応用研究と R&D       85         P 共振器をもちいた絶対長測定実験       85         はじめに       85
第	4.4 <b>5 章</b> 5.1	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2	度と重力波源の方向決定精度 A の応用研究と R&D P 共振器をもちいた絶対長測定実験 10 500000000000000000000000000000000000
第	4.4 5 章 5.1	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2	宿と重力波源の方向決定精度       8         Aの応用研究とR&D       8         P 共振器をもちいた絶対長測定実験       8         加定原理       8         測定原理       8
第	4.4 5章 5.1	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3	渡と重力波源の方向決定精度       85         A の応用研究とR&D       85         P 共振器をもちいた絶対長測定実験       85         はじめに       85         測定原理       85         観測結果       86
第	4.4 <b>5 章</b> 5.1	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4	宿と重力波源の方向決定精度       85         A の応用研究とR&D       85         P 共振器をもちいた絶対長測定実験       85         はじめに       85         測定原理       85         観測結果       86         まとめ       86
第	4.4 5章 5.1	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4	宿と重力波源の方向決定精度       85         A の応用研究と R&D       85         P 共振器をもちいた絶対長測定実験       85         はじめに       85         測定原理       85         観測結果       86         まとめ       86
第	4.4 5章 5.1 5.2	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー	宿と重力波源の方向決定精度       85         A の応用研究と R&D       85         ア 共振器をもちいた絶対長測定実験       85         はじめに       85         測定原理       85         観測結果       86         まとめ       86         リサイクリング       85
第	4.4 5章 5.1 5.2	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.1	idesampling
第	4.4 5章 5.1 5.2	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.1	idesampling
第	4.4 5章 5.1 5.2	時刻精 TAM: 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.1 5.2.2	idestampting       <
第	<ul> <li>4.4</li> <li>5章</li> <li>5.1</li> <li>5.2</li> <li>5.3</li> </ul>	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.1 5.2.2 リサイ	idestampting       <
第	<ul> <li>4.4</li> <li>5章</li> <li>5.1</li> <li>5.2</li> <li>5.3</li> </ul>	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.1 5.2.2 リサイ	idestampting       <
第	<ul> <li>4.4</li> <li>5章</li> <li>5.1</li> <li>5.2</li> <li>5.3</li> </ul>	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.1 5.2.2 リサイ 5.3.1	idestampting       <
第	4.4 5章 5.1 5.2 5.3	時刻精 TAM: 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.1 5.2.2 リサイ 5.3.1 5.3.2	idesampning
第	<ul> <li>4.4</li> <li>5章</li> <li>5.1</li> <li>5.2</li> <li>5.3</li> </ul>	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.1 5.2.2 リサイ 5.3.1 5.3.2	Itestamping       1000000000000000000000000000000000000
第	<ul> <li>4.4</li> <li>5章</li> <li>5.1</li> <li>5.2</li> <li>5.3</li> </ul>	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.1 5.2.2 リサイ 5.3.1 5.3.2 5.3.3	Itestamping       1000000000000000000000000000000000000
第	<ul> <li>4.4</li> <li>5章</li> <li>5.1</li> <li>5.2</li> <li>5.3</li> </ul>	時刻精 TAM: 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.1 5.2.2 リサイ 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4	A の応用研究と R&D       85         P 共振器をもちいた絶対長測定実験       85         はじめに       85         測定原理       85         観測結果       86         まとめ       86         リサイクリング       87         3m プロトタイプ干渉計におけるパワーリサイクリング       87         20m プロトタイプ干渉計のパワーリサイクリング       97         クリング干渉計の信号取得       97         ステアMI の信号取得       97         フロンタル・モジュレーションの問題点       97         光学パラメータを調整する方法       97
第	<ul> <li>4.4</li> <li>5章</li> <li>5.1</li> <li>5.2</li> <li>5.3</li> </ul>	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.1 5.2.2 リサイ 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4	Idesampning       1000000000000000000000000000000000000
第	4.4 5章 5.1 5.2 5.3	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.1 5.2.2 リサイ 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5	Idestingning       1000000000000000000000000000000000000
第	4.4 5章 5.1 5.2 5.3	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.1 5.2.2 リサイ 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5 5.3.6	Itesampning       1000000000000000000000000000000000000
第	<ul> <li>4.4</li> <li>5章</li> <li>5.1</li> <li>5.2</li> <li>5.3</li> </ul>	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.1 5.2.2 リサイ 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5 5.3.6	Intesting Internet in the internet interne
第	<ul> <li>4.4</li> <li>5章</li> <li>5.1</li> <li>5.2</li> <li>5.3</li> <li>5.4</li> </ul>	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.1 5.2.2 リサイ 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5 5.3.6 TAMA	A の応用研究と R&D       85         P 共振器をもちいた絶対長測定実験       85         はじめに       85         測定原理       85         観測結果       86         まとめ       86         リサイクリング       87         20m プロトタイプ干渉計におけるパワーリサイクリング       87         クリング干渉計の信号取得       97         などめに       97         本目の信号取得       97         フロンタル・モジュレーションの問題点       97         高調波復調法       97         高調波復調法       97         本とめ       105         0       105         10       105
第	4.4 5章 5.1 5.2 5.3	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.1 5.2.2 リサイ 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5 5.3.6 TAMA 5.4.1	International State       9         12       2         12       2         12       2         12       2         12       2         12       2         12       2         12       2         12       2         12       3         12       3         12       2         12       3         12       2         12       2         12       2         12       3         12       3         12       12         13       12         14       12         14       12         14       12         15       12         15       12         16       10         17       12         10       10         10       10         10       10         10       10         10       10         10       10         10       10         10       10         10       10
第	<ul> <li>4.4</li> <li>5章</li> <li>5.1</li> <li>5.2</li> <li>5.3</li> <li>5.4</li> </ul>	時刻精 TAM: 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.1 5.2.2 リサイ 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5 5.3.6 TAMA 5.4.1	Itesting       1000000000000000000000000000000000000
第	<ul> <li>4.4</li> <li>5章</li> <li>5.1</li> <li>5.2</li> <li>5.3</li> <li>5.4</li> </ul>	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.1 5.2.2 リサイ 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5 5.3.6 TAMA 5.4.1 5.4.2	宿と重力波源の方向決定精度       8         A の応用研究と R&D       8         P 共振器をもちいた絶対長測定実験       8         はじめに       8         潮定原理       8         観測結果       8         支とめ       8         リサイクリング       8         3m プロトタイプ干渉計におけるパワーリサイクリング       8         20m プロトタイプ干渉計のパワーリサイクリング       9         クリング干渉計の信号取得       9         はじめに       9         RFPMI の信号取得       9         フロンタル・モジュレーションの問題点       9         光学パラメータを調整する方法       9         高調波復調法       9         まとめ       10         の熱雑音       10         熱雑音とは       10
第	<ul> <li>4.4</li> <li>5章</li> <li>5.1</li> <li>5.2</li> <li>5.3</li> <li>5.4</li> </ul>	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.1 5.2.2 リサイ 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5 5.3.6 TAMA 5.4.1 5.4.2 5.4.3	Resempling       1000000000000000000000000000000000000
第	<ul> <li>4.4</li> <li>5章</li> <li>5.1</li> <li>5.2</li> <li>5.3</li> <li>5.4</li> </ul>	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.1 5.2.2 リサイ 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5 5.3.6 TAMA 5.4.1 5.4.2 5.4.3 5.4.3	店と重力波源の方向決定精度       8         A の応用研究と R&D       8         P 共振器をもちいた絶対長測定実験       8         はじめに       8         測定原理       8         観測結果       8         まとめ       8         ワサイクリング       8         3m プロトタイプ干渉計におけるパワーリサイクリング       8         20m プロトタイプ干渉計のパワーリサイクリング       9         クリング干渉計の信号取得       9         はじめに       9         RFPMI の信号取得       9         フロンタル・モジュレーションの問題点       9         高調波復調法       9         高調波復調法       9         まとめ       10         繁雑音とは       10         懸架系の熱雑音       100         懸架系の熱雑音 - final stage の熱雑音       10         懸架系の熱雑音 - final stage の熱雑音       10         第       10         懸架系の熱雑音 - final stage の熱雑音       10         第       10         慶の熱雑音       10         5       10         5       10         5       10         6       10         5       10         5       10         5       10         5       10
第	<ul> <li>4.4</li> <li>5章</li> <li>5.1</li> <li>5.2</li> <li>5.3</li> <li>5.4</li> </ul>	時刻精 TAM: 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.1 5.2.2 リサイ 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5 5.3.6 TAMA 5.4.1 5.4.2 5.4.3 5.4.4	度と重力波源の方向決定精度       8         A の応用研究と R&D       8         P 共振器をもちいた絶対長測定実験       8         はじめに       8         測定原理       8         観測結果       8         電どの       8         リサイクリング       8         3m プロトタイプ干渉計におけるパワーリサイクリング       8         20m プロトタイプ干渉計の信号取得       9         はじめに       9         アロンタル・モジュレーションの問題点       9         アロンタル・モジュレーションの問題点       9         売調波復調法       9         まとめ       10         熟雑音       10         懸架系の熱雑音 - eddy current damping の熱雑音       10         懸架系の熱雑音 - 材質と形状への要求       10
第	<ul> <li>4.4</li> <li>5章</li> <li>5.1</li> <li>5.2</li> <li>5.3</li> <li>5.4</li> </ul>	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.1 5.2.2 リサイ 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5 5.3.6 TAMA 5.4.1 5.4.2 5.4.3 5.4.4 5.4.5	席と重力波源の方向決定精度       8         A の応用研究と R&D       8         P 共振器をもちいた絶対長測定実験       8         はじめに       8         測定原理       8         観測結果       8         観測結果       8         支とめ       8         リサイクリング       8         3m プロトタイプ干渉計におけるパワーリサイクリング       8         20m プロトタイプ干渉計のパワーリサイクリング       9         クリング干渉計の信号取得       9         フロンタル・モジュレーションの問題点       9         光学パラメータを調整する方法       9         高潮波復調法       9         まとめ       10         感架系の熱雑音 - eddy current damping の熱雑音       10         懸架系の熱雑音 - final stage の熱雑音       10         鏡の熱雑音 - 鏡の、部社音 - 鏡の       10
第	<ul> <li>4.4</li> <li>5章</li> <li>5.1</li> <li>5.2</li> <li>5.3</li> <li>5.4</li> </ul>	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.1 5.2.2 リサイ 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5 5.3.6 TAMA 5.4.1 5.4.2 5.4.3 5.4.4 5.4.5 5.4.5	店と重力波源の方向決定精度       8         A の応用研究と R&D       8         P 共振器をもちいた絶対長測定実験       8         はじめに       8         測定原理       8         観測結果       8         まとめ       8         リサイクリング       8         3m プロトタイプ干渉計におけるパワーリサイクリング       8         20m プロトタイプ干渉計の信号取得       9         はじめに       9         RFPMI の信号取得       9         フロンタル・モジュレーションの問題点       9         売調波復調法       9         高調波復調法       9         まとめ       10         熟雑音       10         感知熱離音       10         感の熱雑音       10         鏡の熟雑音       10         第四 私禅幸 際加 た 登 の 白 (通知字)       10         第四 教禅幸 氏 登 の 白 (通知字)       10         第四 私禅幸 際加 た 登 の 白 (通知字)       10         第四 教禅幸 氏 登 の 白 (通知字)       10         第四 教禅幸 影響力       10         第四 教禅幸 影響力       1
第	<ul> <li>4.4</li> <li>5章</li> <li>5.1</li> <li>5.2</li> <li>5.3</li> <li>5.4</li> </ul>	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 1 7 7 - 5.2.1 5.2.2 1 5.2.2 1 5.2.2 1 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5 5.3.6 TAMA 5.4.1 5.4.2 5.4.3 5.4.4 5.4.5 5.4.6	Reと重力波源の方向決定精度       8         A の応用研究と R&D       8         P 共振器をもちいた絶対長測定実験       8         はじめに       8         測定原理       8         観測結果       8         まとめ       8         リサイクリング       8         3m プロトタイプ干渉計におけるパワーリサイクリング       8         20m ブロトタイプ干渉計のパワーリサイクリング       8         20m ブロトタイプ干渉計の信号取得       9         はじめに       9         アレング干渉計の信号取得       9         フロンタル・モジュレーションの問題点       9         光学パラメータを調整する方法       9         高調波復調法       9         まとめ       10         感架系の熱雑音       10         感の熟雑音       10         感の熱雑音       10         鏡の熱雑音 - eddy current damping の熱雑音       10         鏡の熱雑音 - 鏡の intrinsic Q       10         鏡の熱雑音 - 懸架した鏡の Q 値測定       10
第	4.4         5章         5.1         5.2         5.3         5.4         5.5	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.1 5.2.2 リサイ 5.3.3 5.3.4 5.3.5 5.3.6 TAMA 5.4.1 5.4.2 5.4.3 5.4.4 5.4.5 5.4.4 5.4.5 5.4.6 熱雑	rotsampning       6         度と重力波源の方向決定精度       8         A の応用研究と R&D       8         P 共振器をもちいた絶対長測定実験       8         はじめに       8         測定原理       8         観測結果       8         君とめ       8         リサイクリング       8         3m プロトタイプ干渉計のパワーリサイクリング       8         20m プロトタイプ干渉計のパワーリサイクリング       9         クリング干渉計の信号取得       9         はじめに       9         アロンタル・モジュレーションの問題点       9         アロンタル・モジュレーションの問題点       9         高調波復調法       9         まとめ       10         感知雑音       10         懸架系の熟雑音 - eddy current damping の熱雑音       10         鏡の熟雑音 - 続の intrinsic Q       10         鏡の熟雑音 - 鏡の intrinsic Q       10         鏡の熟雑音 - 読少した鏡の Q 値測定       10         10       10         鏡の熟雑音 - 懸架した鏡の Q 値測定       10         10       10         夏の熱雑音 - 読名       10         鏡の熱雑音 - 読知の Q 値測定       10
第	<ul> <li>4.4</li> <li>5章</li> <li>5.2</li> <li>5.3</li> <li>5.4</li> </ul>	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.1 5.2.2 Jサイ 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5 5.3.6 TAMA 5.4.1 5.4.2 5.4.4 5.4.4 5.4.5 5.4.4 5.4.5 5.4.6 萬 5.5 5.5 5.5 5.5 5.5 5.5 5.5 5.5 5.5 5	Rosanpung       3         度と重力波源の方向決定精度       8         A の応用研究と R&D       8         P 共振器をもちいた絶対長測定実験       8         はじめに       8         測定原理       8         観測結果       8         まとめ       8         リサイクリング       8         3m プロトタイプ干渉計のパワーリサイクリング       8         20m プロトタイプ干渉計のパワーリサイクリング       9         なしめに       9         はじめに       9         こしかした       9         なしめに       9         スロンタル・モジュレーションの問題点       9         光学パラメータを調整する方法       9         高調波復調法       9         まとめ       10         熟雑音とは       10         懸架系の熱雑音 - fnal stage の熟雑音       10         鏡の熟雑音 - 都回 いた第の       10         鏡の熟雑音 - 鶴の intrinsic Q       10         鏡の熱雑音 - 観知にた鏡の Q 値測定       10         に関する R&D       10         近の熱雑音       10         近の熱雑音       10         近の熱雑音       10         近の熱雑音       10         近の本       10         近日       10         調波復の熟練音       10         近日       10
第	<ul> <li>4.4</li> <li>5章</li> <li>5.1</li> <li>5.2</li> <li>5.3</li> <li>5.4</li> </ul>	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.1 5.2.2 リサイ 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5 5.3.6 TAMA 5.4.1 5.4.2 5.4.4 5.4.5 5.4.4 5.4.5 5.4.6 萬 第 5.5.1	Rosanpung       9         度と重力波源の方向決定精度       8         A の応用研究と R&D       8         P 共振器をもちいた絶対長測定実験       8         はじめに       8         測定原理       8         観測結果       8         まとめ       8         ワサイクリング       8         20m プロトタイプ干渉計におけるパワーリサイクリング       8         20m プロトタイプ干渉計のパワーリサイクリング       9         クリング干渉計のパワーリサイクリング       9         クレング干渉計のの「ワーリサイクリング       9         フロンタル・モジュレーションの問題点       9         光学パラメータを調整する方法       9         高調波復調法       9         まとめ       10         の熱雑音       10         懸架系の熱雑音 - eddy current damping の熱雑音       10         鏡の熱雑音 - final stage の熟雑音       10         鏡の熱雑音 - if mil stage の熟雑音       10         鏡の熱雑音 - if mil stage の熟雑音       10         鏡の熱雑音 - if mil stage の       10         鏡の熱雑音 - if mil stage の       10         鏡の熱雑音 - if mil stage の       10         前の執維音 - if mil stage の       10         if の教維音 - if mil stage の       10         if の教維音 - if mil stage の       10         if の就維音 - if mil stage の       10         if の 執維音 - if mil
第	<ul> <li>4.4</li> <li>5章</li> <li>5.1</li> <li>5.2</li> <li>5.3</li> <li>5.4</li> </ul>	時刻精 TAM: 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.1 5.2.2 リサイ 5.3.1 5.3.4 5.3.3 5.3.4 5.3.5 5.3.6 TAMA 5.4.1 5.4.2 5.4.3 5.4.4 5.4.5 5.4.4 5.4.5 5.4.4 5.4.5 5.4.4 5.5.1 5.5.2	Rosanpung       9         皮と重力波源の方向決定精度       8         A の応用研究と R&D       8         P 共振器をもちいた絶対長測定実験       8         はじめに       8         測定原理       8         観測結果       8         20m プロトタイプ干渉計の店号取得       8         20m プロトタイプ干渉計の信号取得       9         なじめに       9         アロンタル・モジュレーションの問題点       9         パラメータを調整する方法       9         高調波復調法       9         まとめ       10         勉雑音       10         競の熱雑音       10         競の熱雑音       10         鏡の熱雑音       10         鏡の熱雑音       10         鏡の熱雑音・都知した鏡のQ 値測定       10         板パネの熱雑音の広帯域測定       10         板パネの熱雑音の広帯域測定       10         板パネの熱雑音の広帯域測定       10         板大赤の用した新しい熟雑音推定法の提案とその検証実験       11
第	<ul> <li>4.4</li> <li>5章</li> <li>5.2</li> <li>5.3</li> <li>5.4</li> </ul>	時刻 <b>TAM</b> 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.2 Jサイ 5.3.1 5.3.2 5.3.4 5.3.2 5.3.4 5.3.5 5.3.6 TAMA 5.4.1 5.4.2 5.4.4 5.4.5 5.4.4 5.4.5 5.4.6 六2.5 5.5.2 5.	Roshipming       5         皮と重力波源の方向決定精度       8         Aの応用研究と R&D       8         P 共振器をもちいた絶対長測定実験       8         はじめに       8         測定原理       8         観測結果       8         まとめ       8         リサイクリング       8         3m プロトタイプ干渉計の店号取得       8         20m プロトタイプ干渉計の信号取得       9         はじめに       9         RFPMI の信号取得       9         フロンタル・モジュレーションの問題点       9         光学パラメータを調整する方法       9         高調波復調法       9         まとめ       10         繁架系の熱雑音       10         競の熱雑音       10         競の熱雑音       10         競の熱雑音       10         競の熱雑音       10         競の熟雑音       10         競の熟雑音       10         競の熟雑音       10         競の熟雑音       10         競の熟雑音       10         レ       10         焼の熱雑音       10         レ       10         レ       10         レ       10         焼の熱雑音       10         酸の熟雑音       10
第	<ul> <li>4.4</li> <li>5章</li> <li>5.1</li> <li>5.2</li> <li>5.3</li> <li>5.4</li> </ul>	時刻精 TAM 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 パワー 5.2.1 5.2.2 リサイ 5.3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5 5.3.6 TAMA 5.4.1 5.4.2 5.4.3 5.4.4 5.4.5 5.4.6 韓5.5.1 5.5.2 5.5.3	Roshnjung       9         度と重力波源の方向決定精度       8         A の応用研究と R&D       8         P 共振器をもちいた絶対長測定実験       8         はじめに       8         測定原理       8         観測結果       8         まとめ       9         リサイクリング       8         20m プロトタイプ干渉計のパワーリサイクリング       8         20m プロトタイプ干渉計のパワーリサイクリング       9         なじめに       9         ロレダロ・マブモ渉計の信号取得       9         はじめに       9         RFPMI の信号取得       9         大学パラメータを調整する方法       9         高調波復調法       9         まとめ       10         勉強音とは       10         懸架系の熱雑音 - eddy current damping の熱雑音       10         競の熱雑音 - 新回 stage の熱雑音       10         鏡の熱雑音 - 続の intrinsic Q       10         鏡の熱雑音 - 続の intrinsic Q       10         鏡の熱雑音 - 続の intrinsic Q       10         境の熱雑音 - 続の intrinsic Q       10         「同       10         炭の熱維音の intrinsic Q       10         「同       10         炭の熱維音 - 続知       10         「日       10         炭の熱維音 - 読の intrinsic Q       10         「に関す
第	<ul> <li>4.4</li> <li>5章</li> <li>5.1</li> <li>5.2</li> <li>5.3</li> <li>5.4</li> </ul>	時刻 <b>TAM</b> 300mF 5.1.1 5.1.2 5.1.3 5.1.4 <i>J</i> , 2 5.2.2 <i>J</i> , 3.1 5.2.2 <i>J</i> , 3.1 5.3.2 5.3.3 5.3.4 5.3.5 5.3.6 TAMA 5.4.1 5.4.2 5.4.3 5.4.4 5.4.5 5.4.4 5.5.2 5.4.4 5.5.2 5.5.3 5.5.4 5.5.3 5.5.4 5.5.3 5.5.4 5.5.3 5.5.3 5.5.4 5.5.3 5.5.4 5.5.3 5.5.4 5.5.3 5.5.4 5.5.3 5.5.4 5.5.3 5.5.4 5.5.3 5.5.4 5.5.4 5.5.2 5.5.4 5.5.4 5.5.2 5.5.4 5.5.4 5.5.2 5.5.4 5.5.5.4 5.5.4 5.5.4 5.5.4 5.5.4 5.5.4 5.5.4 5.5.4 5.5.5.4	Reserved       88         皮と重力波源の方向決定精度       88         ア共振器をもちいた絶対長測定実験       88         はじめに       88         潮定原理       88         観測結果       80         まとめ       88         リサイクリング       88         20m プロトタイプ干渉計におけるパワーリサイクリング       88         20m プロトタイプ干渉計のパワーリサイクリング       89         アレング干渉計の信号取得       99         オレショレーションの問題点       99         パンクル・モジュレーションの問題点       99         パンクル・モジュレーションの問題点       91         意調波復調法       91         素線音とは       91         高朝波復調法       91         真の熱雑音       100         熱雑音とは       100         鏡の熱雑音       100         した影       100

# 第1章 TAMA プロジェクト

# 1.1 TAMAの概要

TAMA は日本の中規模重力波検出器計画であり,現在,国立天文台三鷹キャンパスで 300m 基線長のレー ザー干渉計 (TAMA300)の建設が進められている.干渉計の設置は予定通りに終了しており、現在は,観測 開始に向けて装置の技術的調整を行っている段階である.1999年8月からはテストランを開始し,2000年か らは世界に先駆けて重力波の本格的観測を始める予定である.[16,17,18,19]

### 1.1.1 TAMAの概念

TAMA300の目的は,まず,将来のkmクラス大型レーザー干渉計に必要な技術を確立することである.次に,これを実証型検出器として運転し,実際に重力波検出をねらう.300m規模のレーザー干渉計を建設する計画は,1995年度より文部省科学研究費創成的基礎研究(新プロ)「高感度レーザー干渉計を用いた重力波天文学の研究」(代表,古在由秀)として5ヵ年の予定でスタートした.本研究には,国立天文台,東京大学,高エネルギー加速器研究機構,電気通信大学,宮城教育大学,京都大学,大阪大学など多くの研究機関からの研究者が参加している.なお,本プロジェクト名 TAMAは,三鷹が属する多摩地区の多摩よりとられたものである.TAMA300は,欧米のkmクラスの検出器に比べると,スケールは1桁小さい.そのかわり,短時間で建設が可能であり,他にさきがけて観測を開始する予定である.

TAMA300の目標とする感度曲線を図 1.1.1 に示している.低周波では地面の振動が感度をリミットする. 中間周波数では鏡の熱雑音が主要な雑音源となる.さらに高い周波数では、レーザー光のショット雑音が支配的である.目標は、中心周波数 300Hz、帯域幅 300Hz で $h_{rms} = 3 \times 10^{-21}$ の感度を達成することである.この数値は、例えばアメリカの LIGO 計画に比べると、約1桁劣る値である.それでも現時点で達成されている検出器の最高感度に比べて、2桁の改善となっている.

最近になって日本の理論家は, TAMA 向けのターゲットを用意してくれた.MACHO(MAssive Compact Halo Object) は,重力レンズ効果によって発見された謎の天体であり、ダークマターの候補のひとつになっているが,実はこの正体は $0.5M_{\odot}$ 程度の質量をもったブラックホールであり,銀河ハロー内にもあふれているというシナリオである.[20] たくさんあれば,その中で連星を作るものができて,回転にともない重力波を放出し,最後には衝突して,その時,強い重力波を発生する.われわれの銀河ハロー内では,20年に1回程度ブラックホールの衝突がおこり,発生する重力波の振幅は地上で $h_{\rm c}\sim 10^{-18}$ 程度と予測されている.つまり,TAMA でも重力波検出のチャンスは十分あることになる.

#### 1.1.2 TAMAの概略

図 1.1.2 に示したのは, TAMA300の基本的部分の概念図である.基本的には 2 本の腕をもった Michelson 型レーザー干渉計であるが,それぞれの腕は光共振器(Fabry-Perot cavity)を作っている.このような構成 は Fabry-Perot-Michelson 型とよばれるが,共振器を使うことにより実質的な光路長をかせぎ,干渉計の感 度を上げている.[21,8] ビームスプリッターやミラーはワイヤーで吊り下げられている.これは重力波検出 器に必要な自由質量を実現するためと,防振効果のためである.このようなレーザー干渉計に,例えば,真上 から重力波が入射すると,干渉計の一方の腕は伸びて,他方は縮むという効果をおよぼす.これは,2本の腕 から戻ってきた光が作る干渉縞に変化をもたらすので,ビームスプリッターの他端においた光検出器で電気, 信号としてとらえることができる.レーザーとビームスプリッターの間におかれたリサイクリングミラーは, 干渉計内部の実質的な光パワーを増大する役目をもっている.干渉縞は通常,いわゆるダークフリンジ(暗 縞)になるように制御をかけているので,干渉計に入射した光はほとんどがそのままレーザーに戻ってしま う.そこで,リサイクリングミラーでこの反射光を干渉計側に打ち返すことにより,干渉計内部に蓄えられ る光のパワーをかせぐことができる.これがパワーリサイクリングの技術である.[22] このような Recycled Fabry-Perot-Michelson type とよばれる方式は,LIGO や VIRGO でも採用されている.

表 1.1.1 に TAMA300の基本仕様をあげている.レーザー光源には 10W 出力の Nd:YAG レーザー(波長 1064nm)を用いる.これにゲイン 10のパワーリサイクリングを組み込み,レーザーからビームスプリッターまでのパワーロスなどを考慮して,実効レーザーパワーとして 30W を実現する.300mの腕を作る光共振器



図 1.1.1: TAMA300の到達目標感度,重力波源,観測上限値,建設中の検出器の目標感度を示している.超新星爆発による重力波予想値は,15Mpcの距離で10<sup>-3</sup> $M_{\odot}$ のエネルギーが重力波に変換されたとして計算している.中性子星および MACHOの連星合体にともなうチャープ重力波信号は,各周波数における $h_{\rm c} = \sqrt{nh}$ を実効的な強度として図に示している.ここで,nは観測されるチャープ信号のサイクル数であり,hはその時の重力波振幅である.共振型の達成感度は,イタリアの2台の極低温(0.1K)検出器で実現されている値である.[12]また,プロトタイプレーザー干渉計の感度は,Caltechの40m干渉計で報告されているものである.[11]共に,検出器の平均雑音レベルに対応する $h_{\rm rms}$ の値である.かにパルサーからの重力波の上限値(1 $\sigma$ )は,4Kの共振型アンテナを1,900h観測して得られた.[10]同時に,TAMA300およびLIGOIの到達目標感度のスペクトルを示している.[4]これも, $h_{\rm rms}$ の値をプロットしたもので,実用的な検出感度はこれより1桁程度大きな値となる.VIRGOの目標感度はLIGOIと同程度であり,GEO600はTAMA300とLIGOIの中間の感度を目指している.日本の将来計画LCGTは,LIGOIの感度曲線を約1桁改善することをねらっている.



図 1.1.2: 300m 基線長レーザー干渉計 TAMA300の基本概念図.

のフィネスは,周波数応答を考慮して 520 としている.これは,光の折り返し 330 回に相当し,共振器内の 光のストレージタイムは 0.3ms となる.光ビームが通る全長 600m の真空パイプは,直径が 40cm である.そ の内部は,残留ガスによる光路長ゆらぎを防ぐために,10<sup>-6</sup>Pa の真空度に保たれる.幅1m 高さ 1.5m のコ ンクリート製の配管路が地面の下に埋め込まれており,真空パイプはその中に設置されている.これにより, 地表に比べて温度や振動に対して安定した環境を得ることができる.

目標感度	$h_{ m rms} = 3  imes 10^{-21}$ @300Hz ( 帯域幅 300Hz )		
干渉計タイプ	Fabry-Perot-Michelson		
基線長	300m		
ファブリー・ペロー共振器フィネス	520		
光源	注入同期方式 Nd:YAG レーザー , 出力 10W , 波長 1064nm		
パワーリサイクリング	利得 10 倍(干渉計入力実効パワー 30W)		
真空容器内真空度	$10^{-6}$ Pa		
真空パイプ直径	40cm		

#### 表 1.1.1: TAMA300 レーザー干渉計の基本仕様

大まかな光学デザインを図 1.1.3 に示している.干渉信号を読み取るためには,レーザー光に周波数変調 をかける必要がある.そのため,レーザーを出た光は,まず,EOM(Electro-Optical Modulator)をとおり 15.235MHzの周波数変調を受ける.次に,モードクリーナとよばれるリング型共振器を通過する.モードク リーナは3枚のミラーからできており,長さは10m である.この共振器の機能は,レーザー光に含まれる基 本モード TEM<sub>00</sub>以外の高次モードを落とすことである.また,ビームジッターという光軸方向のゆらぎを抑 える役目ももっている.ここを出た光は,リサイクリングミラーを通って,ビームスプリッターで2方向に 分かれ,それぞれが基線長 300m の共振器に入射する.それぞれのミラーおよびビームスプリッターは,独 立な真空タンク内に収められている.



図 1.1.3: TAMA300 の光学レイアウト.

### 1.1.3 世界の大型計画

現在,表1.1.2 に示したようなレーザー干渉計重力波検出器が,世界各地で大型プロジェクトとして走り出している.[4] もっとも大規模なのはアメリカの LIGO(Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory) 計画であり,Hanford と Livingston にそれぞれ基線長 4km のレーザー干渉計を建設中である.ヨーロッパでは,イタリアの Pisa に 3km のレーザー干渉計 (VIRGO)を,フランスとイタリアが共同で建設している.そのほか,ドイツ・イギリス連合が,600m レーザー干渉計 (GEO600)をドイツ Hannover に,日本が三鷹に300m レーザー干渉計 (TAMA300)を建設中である.これらが本格的に動き始めれば,かつてない重力波検出のチャンスがおとずれることになる.

プロジェクト名	参加国	基線長	設置場所	観測開始予定(年)
LIGO	アメリカ	4km $(2$ 基)	Hanford/Livingston	2002
VIRGO	フランス/イタリア	$3 \mathrm{km}$	Pisa(Italy)	2003
GEO	ドイツ/イギリス	600m	Hannover(Germany)	2001
TAMA	日本	$300\mathrm{m}$	三鷹	2000

表 1.1.2: 世界の大型レーザー干渉計重力波検出器計画

TAMA300は,2000年から本格的な観測体制にはいる.これですぐに重力波が見つかるとは思わないが,超 新星爆発からのニュートリノをはじめて検出したカミオカンデのような例もある.SN1987Aのようなラッキー イベントが,TAMAを待ち受けているかもしれない.TAMAにつづいてその数年後には,GEO,LIGO,VIRGO が本格的な稼動をはじめる.確実に1年に数発の重力波をとらえるためには,日本のLCGTやLIGO II など の,いわゆる advanced detectorの実現が不可欠である.

## 1.2 現状の概略

#### 1.2.1 TAMAの技術

直径 40cm の全長 600m におよぶ真空ダクトの内部は, ECB(Electro-Chemical Buffing) という研磨法で処理されており, ベーキングなしで  $10^{-6}$ Pa という真空度を実現している. [23]

光源となる 10W のレーザーは, ソニー(株)中央研究所によって開発されたものである.700mW 出力の 高安定なマスターレーザーに, 10W のスレーブレーザーを注入同期させるという方法で,高出力かつ高安定 な出力を得ている.[24] ミラーは日本航空電子工業(株)で作られたもので,損失が ppm オーダーという世 界でもトップレベルの水準を実現していることが確認された.[25]

TAMA で導入されるパワーリサイクリング技術に関しては、プロトタイプのレーザー干渉計を用いて技術 開発が行われている.東大理学部の3mレーザー干渉計において、世界で初めて、実際の重力波検出器と同じ 構成で、リサイクリングの実現に成功した.[26] その後、国立天文台の20mレーザー干渉計においても、同 様なリサイクリングを達成している.また、レーザー干渉計は、ミラーの多数の位置自由度を制御するため の、非常に複雑な制御系をもっている.このため、いかに精度良く制御に必要な信号を分離して取り出すか が大きな問題であったが、新しい信号分離法が提案され、[27] TAMA において採用されることになった.

TAMAのミラーは2本のワイヤーで吊下げられているが,防振比をかせぐために,図1.2.4に示すような2 重振り子の構成になっている.中間マスのまわりに強力な永久磁石を配置し,渦電流によるエネルギーロスを 与えることにより,約1Hzの振り子運動をダンピングさせている.[28]さらに,2重振り子は,おもりとゴム を交互に重ねたスタックの上にのせられて防振されている.ミラーやそれを吊るすワイヤーからでる熱雑音 は,TAMAの感度にとって深刻な問題であり,熱雑音を低減するための,さまざまな研究が続けられている.



図 1.2.4: ミラー懸架装置とスタック防振系の概念図.ミラー(直径 100mm,厚さ 60mm 石英)は2 重振り 子で吊り下げられ,さらにその下の3 重のスタックで防振される.

#### 1.2.2 TAMAの現状

建物関係や真空槽の設置,およびミラーなど光学系の真空内へのインストールは,ほぼすべて完了している.現在精力的に行われているのは,レーザー干渉計本体の動作テストと調整である.

モードクリーナとして機能するリング型共振器は,同時に周波数変調のサイドバンドを通過させる必要がある.このため,周波数変調の周波数と,共振器のFSR(Free Spectral Range)を一致させることにより,サイドバンドがモードクリーナを通過できるようにする技術が開発された.周波数変調の周波数を制御することにより,付加的な雑音を抑えながら,モードクリーナとして機能することが確認されている.

干渉計のミラーはワイヤーで吊られているため,常に姿勢を一定に保つための,アライメントコントロールは不可欠である.WFS(Wave Front Sensing)法という方法を用いて,それぞれのミラーのpitch(水平軸まわりの回転)とyaw(垂直軸まわりの回転)の情報を独立に取り出すことが可能である.これを用いて,片腕 300mの光共振器のアライメントコントロールの実験が行われた.結果は満足できるものであり,角度ゆらぎを10<sup>-7</sup>rad程度まで抑えることができた.

現在は,2つの腕から戻ってきた光を,もう一度ビームスプリッターをとおして再結合・干渉させる,リコンバイン実験が行われている.10Wレーザーおよびモードクリーナ-を含む設定であり,パワーリサイクリングを除くと,最終的な光学系のセッティングと同じものである.また,ミラーのオートアライメントも順調に動作している.すでに連続1時間程度のリコンバイン動作には成功しているので,長期的な運転にこぎつけるのも時間の問題である.また,様々な部分を調整して,雑音を下げ,干渉計としての感度を向上させる努力も同時に行われている.

干渉計の信号は、20kHz サンプリングで計算機に取りこまれるが、その他の信号も含めると、600kB/s という膨大なデータ量になる.ここで蓄えられた信号データの解析の準備も進んでいる.連星合体にともなうチャープ信号に対しては、テンプレートとよばれる予測波形を用意しておき、両者を比較するという、マッチドフィルターの手法を用いる.また、ひとつの検出器単独での重力波キャッチはむずかしいため、当然、国際共同観測が必要となる.そのための共通データフォーマット、データ交換、データ解析法等の研究が、国際協力の形で行われている.

### 参考文献

- [1] C. M. Will: Theory and Experiment in Gravitational Physics, revised edition (Cambridge Univ. Press, 1992).
- [2] V. B. Braginsky and F. Y. Khalili: Quantum Measurements (Cambridge Univ. Press, 1992) .
- [3] J. H. Taylor and J. M. Weisberg: Astrophys. J. 345 (1989) 434.
- [4] 世界の各プロジェクトの比較的最近の進展状況が書かれた文献として, K. Tsubono, M.-K. Fujimoto and K. Kuroda eds.: Gravitational Wave Detection (Universal Academy Press, 1997).
- [5] K. S. Thorne: in 300 years of Gravitation, S. W. Hawking and W. Israel eds. (Cambridge Univ. Press, 1987) p.330.
- [6] B. F. Schutz: in Proc. 1995 Les Houches School on Astrophysical Sources of Gravitational Radiation, J.-A. Marck and J.-P. Lasota eds. (Springer, 1996).
- K. S. Thorne: in Proc. Snowmass 94 Summer Study on Particle and Nuclear Astrophysics and Cosmology, E. W. Kolb and R. Peccei eds. (World Scientific, 1995) p.160.
- [8] 中村卓史,三尾典克,大橋正健編: 重力波をとらえる (京大出版会, 1998).
- [9] 柴田大: 日本物理学会誌 53 (1998) 581.
- [10] T. Suzuki: in Proc. First Amaldi Conference on Gravitational Wave Experiments, E. Coccia, G. Pizzella and F. Ronga eds. (World Scientific, 1995) p.115.
- [11] A. Abramovici, W. Althouse, J. Camp, D. Durance, J. A. Giaime, A. Gillespie, S. Kawamura, A. Kuhnert, T. Lyons, F. J. Raab, R. L. Savage Jr., D. Shoemaker, L. Sievers, R. Spero, R. Vogt, R. Weiss, S. Whitcomb and M. Zucker: Phys. Lett. A **218** (1996) 157.
- [12] E. Coccia: in Laser Interferometer Space Antenna, W. M. Folkner ed. (AIP, 1998) p.226.
- [13] L. Iess, B. Bertotti, G. Giampieri, A. Vecchio, R. Ambrosini, J. W. Armstrong, S. W. Asmar, H. D. Wahlquist, G. Comoretto, Y. Koyama and A. Messeri: in *Proc. First Amaldi Conference on Gravitational Wave Experiments*, E. Coccia, G. Pizzella and F. Ronga eds. (World Scientific, 1995) p.64.
- [14] V. M. Kaspi, J. H. Taylor and M. F. Ryba: Astrophys. J. 428 (1994) 713.
- [15] L. M. Krauss and M. White: Phys. Rev. Lett. 69 (1992) 869.
- [16] 坪野公夫: 「ニュートリノと重力波」日本物理学会編(裳華房,1997) P.225.
- [17] 藤本眞克: 天文月報 91 (1998) 8.

- [18] 三尾典克: 応用物理 66 (1997) 939.
- [19] 川村靜児: 計測と制御 **37** (1998) 852.
- [20] T. Nakamura, M. Sasaki, T. Tanaka and K. S. Thorne: Astrophys. J. 487 (1997) L139.
- [21] P. Saulson: Fundamentals of Interferometric Gravitational Wave Detectors (World Scientific, 1994).
- [22] R. W. P. Drever: in *The Detection of Gravitational Waves*, D. G. Blair ed.(Cambridge Univ. Press, 1991) p.306.
- [23] Y. Saito, N. Matsuda, Y. Ogawa and G. Horikoshi: Vacuum 47 (1996) 609.
- [24] S. T. Yang, Y. Imai, M. Oka, N. Eguchi and S. Kubota: Opt. Lett. 21 (1996) 1676.
- [25] N. Uehara, A. Ueda, K. Ueda, H. Sekiguchi, T. Mitake, K. Nakamura, N. Kitajima and I. Kataoka: Opt. Lett. 20 (1995) 530.
- [26] M. Ando, K. Arai, K. Kawabe and K. Tsubono: Phys. Lett. A 248 (1998) 145.
- [27] M. Ando, K. Kawabe and K. Tsubono: Phys. Lett. A 237 (1997) 13.
- [28] K. Tsubono, A. Araya, K. Kawabe, S. Moriwaki and N. Mio: Rev. Sci. Instrum. 64 (1993) 2237.
- [29] T. Uchiyama, D. Tatsumi, T. Tomaru, M. E. Tobar, K. Kuroda, T. Suzuki, N. Sato, A. Yamamoto, T. Haruyama and T. Shintomi: Phys. Lett. A 242 (1998) 211.

# 第2章 TAMA300レーザー干渉計の開発と現状

# 2.1 TAMA300の構成

TAMA300 干渉計は、両腕に長さ 300m のファブリ・ペロー (Fabry-Perot, FP) 共振器を組み込んだマイ ケルソン干渉計である。その概要を述べる。

レーザーを出た光はモードクリーナーと呼ばれる FP 共振器に入る。このモードクリーナーは入射光の空間的なモードを整形し、周波数雑音を制御するための周波数の基準の役目もする。本計画ではこの共振器に リング型共振器を用いる。それは、リング型共振器が進行波型の共振器で、干渉計本体の共振器からの戻り 光と結合しにくいためである。

そして、これを透過した光はビームスプリッターで2つに分けられて主共振器に入る。これは基線長が300mの巨大な FP 共振器である。主共振器から反射して戻ってきた光は再びビームスプリッターで合わされて干渉し光検出器に入る。

光源となるレーザーは、半導体レーザー励起 Nd:YAG レーザーで、単一モード単一周波数で発振し、連続 出力で約 10W の光を発生できる。そのため、注入同期の技術を利用したレーザー装置が開発された。更に、 レーザーには光源のもつ雑音を抑えるための安定化システムが組み込まれている。

また、干渉計全体では非常に大きなパワーの光を扱わなければならない。そのため、光学部品を構成する 基材やコーティングに僅かな損失があっても命取りになる。また、ミラー自身は弾性体であり、熱振動を行っ ている。この熱振動の大きさは、ミラーの機械的な損失(と温度)によって決まっているので、機械的にも 非常に低損失の材料が要求される。このような要求を満たすように、材料・形状等が選択され、最新の技術 で光学素子に加工されている。

干渉計の感度をあげる方法としてはリサイクリングと呼ばれる技術が提案・開発されている。これはレー ザーから干渉計に入った光が干渉計から反射されてくるので、これを再びリサイクリングミラーという鏡を 用いて干渉計の内部へ戻し、等価的に光源のパワーを増大させる方法である。TAMA300でもこの技術を導 入すべく、設計が行われている。

また、非常に重要な役割を果たすのが防振系と制御系である。干渉計を構成するほとんどの光学要素は振 り子のように吊り下げられて支持される。そして、その振り子は更に防振装置の上に設置される。振り子を含 む防振系は外乱振動を減衰させる役目をもち、これが十分でないと意味のある測定ができない。しかし、こ のような系は低い周波数に機械共振があり、その共振周波数付近では大きな揺れをもつ。そのため、干渉計 が安定に動作するためには複雑な制御系が必要である。TAMA300では、この複雑さを回避するため、受動 的なダンピングシステムを開発・採用した。これによって、システムが非常に単純化され、安定度が向上し ている。

さらに、このような巨大な光共振器を含む光学系を動作させるためには、精密なアラインメンと調整を行 う必要がある。そのための光学系と制御系もシステムに組み込まれており、光路長制御と同時に動作させる ことによってきわめて安定な動作を実現できる構成となっている。

さらには、全体を納める真空装置が必要である。km クラスの干渉計で、残留ガスの揺らぎが光路長に及ぼす 影響をなくすためには、内部の真空度を10<sup>-6</sup>Pa 程度に保たなければならないと考えられている。TAMA300 では、2 本腕の合計で600mの真空ダクトが地下に設置されている。この真空度は素粒子加速器などに比べれ ば余り高いものではないが排気しなければならないものの容積と表面積が非常に大きいために、多くの排気 装置が必要である。そこで、材質や表面処理に工夫を凝らして、まったくベーキングをしないでほぼ所定の 真空度を達成した。

以下、干渉計の心臓部といえる光学系と制御系について述べる。

## 2.2 TAMA300の光学系

図 2.2.1 は、TAMA300 の光学系の全体を模式的に表したものである。主要な光学系は長さ 300 m の主共振器とリサイクリングミラー、モードクリーナーである。

主共振器は、平面鏡(反射率:98.8%)と凹面鏡(曲率半径:450m、反射率:99.99%)で構成される。このとき、内部にできる光学モードのビーム半径は、平面鏡のところで8.46mm、凹面鏡の位置で14.65mmとなる。また、平面鏡の入射側にはウエッジ(ウエッジ角:9分=2.6mrad)がついている。鏡は、直径10cm、



図 2.2.1: TAMA300 の光学系の概要

長さ6cmの円柱で合成石英製である。

ビームスプリッターは、やはり合成石英製で直径15cm、厚さ4cmである。また、コーティングはS偏光に対して設計されている。

干渉計の制御を行うために、ビームスプリッターと2つの主共振器の間の距離には差がつけられている。 入射に沿った方向の共振器 (Inline Cavity, IC)は、直交方向の共振器 (Orthogonal Cavity, OC)に対して、  $\Delta \ell$  だけ離れた位置にある。真空装置は、鏡を真空タンクの中央に設置した場合、 $\Delta \ell = 50 \text{ cm}$ になるように 設計されている。しかし、 Phase I では、鏡の位置をタンク内でずらして  $\Delta \ell = 90 \text{ cm}$ として全体の設置を 行う。Phase II でリサイクリングが行われる場合には、この値は再調整が必要である。

モードクリーナーは、リング共振器で長さが約10mとなっている。この共振器長は、干渉計を制御するための位相変調の側帯波が透過するように決められる。 TAMA300 では変調周波数は15.235 MHz なので、一周の共振器長は19.6915mとなる。共振器は2枚の平面鏡と1枚の凹面鏡(曲率半径:15m)で構成され、共振器の基本モードのビームウエストのサイズは約1.5mm である。

そして、モードクリーナーと主干渉計の光学モードをマッチングさせる望遠鏡、干渉計から反射されてきた光を取り出す光サーキュレータなどが配置されている。これが、TAMA300の光学系の基本構造である。

#### 2.2.1 光学要素の配置

各光学要素は、真空装置の内部に設置される。以下、それを示す。

2.2.1.1 ニアミラータンク

平面鏡のウエッジのため、300mの共振器をダクト内に収めるためには、ビームをダクトに対して、傾けて 入射しないといけない。このことを出発点に光学系の配置を考える。

平面ミラーのウエッジ角は、ウエッジ面で反射された光がビームスプリッターの位置で、メインのビームと分離するという条件で決めた。ウエッジ角を  $\alpha$  とすると、主共振器の光軸に対する入射角  $\delta$  と、ウエッジ面での反射光が光軸となす角  $\delta'$  は  $\delta = (n-1)\alpha$  と  $\delta' = (n+1)\alpha$  で与えられる。ここで、n は鏡の基板の屈折率(石英はn = 1.45)である。 $\alpha = 2.6$  mrad なので、 $\delta = 1.2$  mrad、 $\delta' = 6.3$  mrad である。

2.2.1.2 センタータンク

センタータンク内には、ビームスプリッターとアライメント制御用信号をとるためのピックオフプレート が入る。これらは平行平面基板であるが、45度で入射するため、ビームの位置が平行移動する。石英に対し て、45度入射の時のシフト量は 0.31*d* となる。ビームスプリッターは厚さ 4 cm、ピックオフプレートは 3 cm なので、それぞれ 12.4 mm、9.3 mm だけシフトする。

#### 2.2.1.3 リサイクリングミラータンク・MC タンク

レーザーをでた光は、モードクリーナーで整形されて、主干渉計に入る。主干渉計の光のビーム径はモー ドクリーナーからの光のビーム径の約5倍である。これを2枚のレンズを使ってマッチングさせる。しかし、 レンズを別々に支えるとレンズ間の距離の変動の影響が大きくなる。そこで、望遠鏡を構成するレンズは一 体構造とする。

ここでは、ガリレイ式望遠鏡を採用した。望遠鏡は、凸レンズ(口径:100 mm、焦点距離:520 mm)と凹レンズ(口径:50 mm、焦点距離:-90 mm)を使っている。この倍率、および、設置場所は、モードクリーナーと主干渉計のガウスモードの結合が最適になるように決定した。この望遠鏡で、ビームの平行移動は5.2倍になるが、角度揺れは1/5.2になる。よって、望遠鏡の防振に関しては、並行移動の成分を十分に行なう必要がある。そこで、全体は懸架されている。そして、主干渉計で反射された光は、光源に戻らず外部に導かれるように光サーキュレーターを設置する。この主要な部品はファラデー回転子と偏光素子である。しかし、口径の大きな物は非常に高価であるので、TAMAでは、このサーキュレータをモードクリーナーの直後に設置することにした。また、モードクリーナーと主干渉計の光学軸をあわせるための機構を一緒に組み込んだ。図2.2.2 は光サーキュレータの概略図である。ファラデー回転子は口径15 mm でTGG 結晶を用いたものを用いる。また、偏光子はブリュースター角( $\tan \theta = n$ で与えられる)で入射するタイプのプレート型のものを用いる。このとき、入射角は45度ではなく、55.4度で入射する必要があり、またS偏光を使用するため、反射光を利用した光学系となっている。また、途中の半波長板はファラデー回転子を通過した後(偏光面が45 度回転している)の偏光を再びS偏光に戻すためのものである。

そして、一度曲げられた光路を元の光路の戻すために用いる鏡をピコモーターで制御することで、モード クリーナーと主干渉計の間のアラインメントを行う。



図 2.2.2: 光サーキュレータの概略図

2.2.1.4 検出系

ビームスプリッターのアンチシメトリックポートからの干渉光は、重力波の信号を含む一番重要な光である。この光は、タンクの外で集光されて、光検出器に入る。しかし、非常に高いパワーの光を光電変換しな

ければならないので、単一のフォトダイオードでは受光できない。そのため、複数のフォトダイオードで分割して受光するシステムが設置されている。同様に、光サーキュレータからの光も同じようなシステムで光 電変換され、それぞれの信号は制御系へと渡される。

さらに、個々の腕の光を一部取り出し、アラインメント制御や引き込み動作を行うために使用する。その ための、光学系が付随する。

# 2.3 TAMA300の制御

TAMA300の制御系は、大きく分けて以下の4つの系統からなる。

- 1. 差動光路長制御系
- 2. 同相光路長制御系
- 3. MC-Laser 制御系
- 4. アラインメント制御系

以下、それぞれの制御系に関して説明する。

#### 2.3.1 差動光路長制御系



☑ 2.3.3: Control system of Fabry-Perot-Michelson interferometer.

図 2.3.3 に差動制御系の概要を示す。 $\delta L_{-}$ は、arm cavity 長の差動変動を表し、重力波の信号を含む。この信号は、dark portの光を検出し、quadrature-phase で復調することで得ることができる ( $V_{DQ}$ )。 $\delta l_{-}$ は、 beam splitter 変動を表す。この信号は reflection port の光を、quadrature-phase で復調することで得ること ができる ( $V_{RQ}$ )。

 $\delta L_{-}$ は、2 つの front mirror に差動で feedback される。この制御帯域は、ゲインを大きく取り、強度雑音の影響を避けるために可能な限り大きく取る。この帯域は鏡の共振によって制限される。

 $\delta l_{-}$ は、beam splitter に feedback される。 $\delta l_{-}$ 信号の shot noise level はそれほど良くないため、この制御 帯域を広く取ると、重力波観測周波数帯 (150 Hz ~ 450 Hz) でかえって beam splitter を大きく揺らすことに

なり、干渉計感度が低下する。従って、 $\delta l_{-}$ 制御帯域は狭くしなければならない。しかし、帯域を狭くすることで、制御で抑え切れない beam splitter の RMS 変動が大きくなり、強度雑音の影響を受けやすくなる。これらの影響を考慮に入れて制御系の設計を行う必要がある。

#### 2.3.2 干渉計の特性

制御系の設計にあたって必要な干渉計の特性をまとめておく。

#### 2.3.2.1 鏡の変動



☑ 2.3.4: Displacement spectrum of suspended mirrors of TAMA300.

図 2.3.4 に干渉計の鏡の変動量を示す。実線は鏡の変動のスペクトルを表し (左の縦軸)、破線はその周波数 以上の変動の RMS 振幅を表す (右の縦軸)。この変動量は、地面振動の測定値に、スタックとサスペンション の防振比の測定値を掛け合わせることで求められている。青線は地面の光軸方向 (X 方向)の変動が鏡の光軸 方向の変動に伝わる影響を表している。また、赤線は地面の鉛直方向の変動が、鏡の光軸方向への変動に伝 わる影響を表す。黒線は、TAMA Phase I での目標変位感度  $5 \times 10^{-19} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ を表す。

この図より、地面振動レベルは、観測帯域で目標感度以下に抑えられており、また、RMS で数 µm 程度変動していることが分かる。

#### 2.3.2.2 得られる信号の感度

表 2.3.1:	干渉計より得られる信号の感度	

$\delta L_{-}$		$\delta l_{-}$	Shot-noise level
$V_{\rm DQ}$	1	$3.0  imes 10^{-3}$	$8.5 \times 10^{-20} \text{ [m/\sqrt{Hz}]}$
$V_{\rm RI}$	$3.0  imes 10^{-3}$	1	$2.0 \times 10^{-16} \text{ [m/\sqrt{Hz}]}$

表 2.3.1 に、干渉計から得られる差動変動信号の混入比と shot-noise level を示す。

 $V_{\rm DQ}$ 信号は $\delta L_{-}$ 変動に対して敏感であり、 $\delta l_{-}$ 変動に対する感度はその1/330である。この信号の $\delta L_{-}$ 変動に対する shot-noise level は、 $8.5 \times 10^{-20} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ である。また、この shot-noise level は、480 Hzのカットオフ周波数以上では低下していく。

一方、 $V_{\rm RQ}$  信号は $\delta l_-$  変動に対して敏感であり、 $\delta L_-$  変動に対する感度はその 1/330 である。この信号の  $\delta l_-$  変動に対する shot-noise level は、 $2.0 \times 10^{-16}$  m/ $\sqrt{\rm Hz}$  である。この信号は周波数応答をほとんど持た ない。

#### 2.3.3 制御系の設計

差動制御系に要求される値を表 2.3.2 にまとめておく。

表	表 2.3.2: 差動制御系設計に対する要求値。				
	制御ゲイン	残留 RMS 振幅			
$\delta L_{-}$	$< 10^{-6}$ (30 kHz)	$< 5.0 \times 10^{-12}~{\rm m}$			
$\delta l_{-}$	$< 8.4 \times 10^{-2}$ (150 Hz)	$<2.0\times10^{-8}~{\rm m}$			





 $\boxtimes$  2.3.5: Open loop transfer function of the  $\delta L_{-}$  control loop.

☑ 2.3.6: Open loop transfer function of the  $\delta l_{-}$  control loop.

そして、その条件を満たすよう設計した差動制御系のオープンループ伝達関数を図 2.3.5、図 2.3.6 に示す。  $\delta L_{-}$ 制御系の Unity gain frequency は、780 Hz であり、位相余裕は 45 度である。DC 付近でのゲインは 7.2 × 10<sup>7</sup>、30 kHz でのゲインは 2.5 × 10<sup>-7</sup> である。この制御ループの計算には、フィルターの伝達関数の 他に、振り子の伝達関数、 $\delta L_{-}$  信号のカットオフ、コイルドライバー用マトリックス回路<sup>1</sup>の伝達関数を考慮 に入れている。

また、 $\delta l_{-}$ 制御系の Unity gain frequency は、15 Hz であり、位相余裕は 39 度である。DC 付近でのゲインは  $3.4 \times 10^3$ 、150 Hz でのゲインは  $9.2 \times 10^{-3}$  である。この制御ループの計算には、フィルターの伝達関数と振り子の伝達関数を考慮に入れれば良い。

# 2.4 同相光路長制御系とMC-Laser 制御系

この制御系は、共同して干渉計の制御とレーザーの周波数安定化を同時に行う。

光源である 10W レーザーは、まず、10m MC を周波数基準器として周波数安定化される。このとき 10m MC からの全ての誤差信号は 10W レーザーにフィードバックされる。そして、干渉計から得られた同相信号  $L_+$  は 2 つに分割され、その低周波成分は 10m MC のマグネットコイルへ、高周波成分は前段の 10m MC に よる周波数安定化ループに注入される(フィードアラウンド)。このようにして、レーザーの周波数が主干渉 計を基準に安定されると同時に同相光路長の制御が実現される。全体の構成を図 2.4.7 に示す。

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>10 Hz の LPF と 100 Hz の HPF が組み込まれている。



図 2.4.7: 同相光路長制御と周波数安定化制御の全体図

2.4.1 制御システム

2.4.1.1 モードクリーナー

10m MC による周波数安定化系を考える。図 2.4.7 のように、この系の利得は全て 10-W レーザーにフィー ドバックされる。図 2.4.8 のような利得配分にすれば、@100 Hz で 200 dB、@1 kHz で 160 dB の利得を得るこ とが可能である。ユニティゲイン周波数  $f_{\text{unity of MC}}$  は 700 kHz である。周波数制御には NPRO の温調端子、 PZT 端子、外部 EOM をアクチュエータとして使用する。MC による周波数安定化の利得は全て 10W レー ザーに寄与するが @100 Hz、@1 kHz で  $\delta \nu = 10^{-4} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$  の周波数安定度になる。これはフィードバック サーボの電気雑音で決定している。

2.4.1.2 干涉計

干渉計の同相信号を用いた周波数安定化のためのマグネットコイル系とフィードアラウンド系は図 2.4.9 に示 すように決めた。 $DC \sim 1 \text{ Hz}$ の誤差信号は 10 m MC のマグネットコイルにフィードバックし、1 Hz  $\sim$  20 kHz の誤差信号は 10 m MC による周波数安定化系に注入 (feedaround) して制御を行う。この 2 つの系のクロス オーバー周波数は 1 kHz である。フィードアラウンド系で決定されるユニティゲイン周波数  $f_{\text{UGI}}$  と 10 m MC による周波数安定化系のユニティゲイン周波数  $f_{\text{UGMC}}$ の関係は

$$f_{\rm UGI} < \frac{1}{3} \times f_{\rm UGMC}$$

を満たし、さらに exess ノイズとの兼ね合いで設計した。

クロスオーバー周波数以下の帯域でフィードアラウンド系の利得が急激に減少しているのは後述する Excess ノイズとの兼ね合いによるものである。一方、マグネットコイル系はフィードアラウンド系とクロスした後 で鏡の機械共振の影響を除去ために非常に急激に落とし、かつ鏡の機械共振周波数 27 kHz の BEF で落とし ている。

干渉計での周波数安定化系で得られる利得は @100 Hz で 80 dB、@1 kHz で 30 dB が得られる。このような利得で周波数安定化すると 10 m MC 透過後のレーザーの絶対周波数雑音は図 2.4.10 のように更に安定化され、@100 Hz、@1 kHz でそれぞれ  $\delta \nu = 1 \times 10^{-5} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、 $\delta \nu = 2 \times 10^{-6} \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ となる。ところが、干渉



図 2.4.8: モードクリーナーループでのゲイン配分

図 2.4.9: 干渉計での周波数安定化利得と位相

計での周波数安定化の場合は前述のように相対周波数雑音が問題となるため誤差信号(この場合干渉計からの同相信号  $L_+$ )評価をすれば良いから、 $30 \text{ Hz} \sim 200 \text{ Hz}$ ではショットノイズで制限され、また観測帯域では要求されたレーザー周波数安定度  $\delta \nu = 5 \times 10^{-7} \text{ Hz} / \sqrt{\text{Hz}}$ が満たされている。

# 2.5 アラインメント制御

鏡の角度揺れの制御(アラインメント制御)は長基線の干渉計の安定動作には不可欠である。TAMA300では、鏡の角度揺れ(ミスアラインメント)の検出にはWave Front Sensing(WFS)と呼ばれる方法を用いた。これは光共振器のキャリアとサイドバンドに対する応答の違いを違いを利用する方法で、その原理を図2.4.11に示す。基線長300m共振器の制御はこれまで世界にも例がなく、TAMAでの実装が最初の例となる。WFSは共振器からの反射光のみを利用してミスアラインメントを検出するが、共振器を構成する二つの鏡のミスアラインメントの信号分離は検出器までの光学系を調節することで行われる。このアラインメント制御導入によって共振器の安定な制御が可能になり、共振器の長時間運転が可能になる。

制御の概念図を図 2.5.12 に示す。

FP cavity は TAMA interferometer の片腕である基線長 300m の Fabry-Perot 共振器を表している。共振器を構成する鏡には4 つのコイル-マグネットによるアクチュエータが取り付けられており、コイルに流す電流を調整することで鏡の位置制御や姿勢制御が行われる。

干渉計を制御するために位相変調をかけられた光は Fabry-Perot 共振器に入射され、共振器からの反射光 をピックアップする。反射光は単一受光面のフォトディテクタと2つの4分割受光面のフォトディテクタと で検出される。単一受光面のフォトディテクタの信号は復調され、前述の光路長制御に用いられる。

二つの 4 分割フォトディテクタは Wave Front Sensing によるアラインメント制御の信号検出に用いられる。Front Mirror の傾き  $\alpha_F$  によって生じるミスアラインメントは共振器から 4 分割ディテクタまでに進む Guoy Phase  $\eta$  が

$$\propto \left(\frac{R-d}{w_0}\sin\eta_l - \frac{1}{\alpha_0}\cos\eta_l\right)\alpha_F \tag{2.5.1}$$

という進み方をし、また end mirror の傾き  $\alpha_E$  に対しては

$$\propto \left(\frac{R}{w_0}\sin\eta_l\right)\alpha_E\tag{2.5.2}$$



図 2.4.10: 干渉計 (TAMA300) 周波数安定度 (PhaseI)



図 2.4.11: WFS の概念図



図 2.5.12: アラインメント制御システムの概念図



図 2.5.13: 300m 光共振器のアラインメント制御

という進み方をするのでディテクタまでに進む Guoy Phase の調整によって両者を分離することができる。具体的には検出系の path に違うレンズ系を配置することで行われる。信号はコイル-マグネットアクチュエータに feedback され鏡の姿勢制御が行われる。

また end mirror への feedback の為に 300m の信号伝送を行わなければならない。この際ノイズの混入を防 ぐため、アナログ信号を直接送るようなことはせず、デジタル変換を通じて光信号へ変換するモジュールを 利用している。信号は光ファイバーを通じて 300m 先へ伝送されそこでアナログ信号に戻されて、アクチュ エータに返されている。

# 2.6 TAMA300の現状

以上のようなシステムを構築し、干渉計の動作の確認をステップバイステップで行ってきた。最初の大き な成果は、300m 共振器の光路長とアラインメントの制御を同時に行ったことである。図 2.5.13 の時のデータ の様子を示す。光路長だけの制御では、透過光強度が不安定であるが、これは鏡の揺れをによって生じるア ラインメントの狂いが原因である。しかし、アラインメント制御を行うことで、揺れの影響がなくなり干渉 計の安定度が大きく向上したことがわかる。

その次の段階として、干渉計のすべての自由度に対して制御が行われ動作の確認が行われたことである。こ のような巨大な干渉計が動作したのはまったく世界で最初の例となった。その様子を図 2.6.14 に示す。これ は時系列のデータで、共振器からの透過光、およびビームスプリッターの干渉光をプロッタしたものである。 ただ、このときはレーザーは小型のものを使用していた。また、10W レーザーは10m MC との結合実験に成 功した。MC のフィネスは主共振器よりも高いので内部パワーが大きい。そのため、高出力レーザーに対す る振る舞いが心配されたが、おおむね良好に動作できることを確認した。このような高出力レーザーと大型 MC の結合系の実現も世界で最初の例となった。

このような経過を経て、現在、TAMA300は、リサイクリングを除く、すべての光学系と制御系が完成し、 試験運転を行っている。その際、測定された雑音レベルを、図 2.6.15 に示す。残念なことに、測定された雑 音レベルは、予定の雑音レベルに比べるとはるかに大きなものである。しかし、この測定は、まったく最初 の試みであり、いろいろな不具合を含んでいる。これからの課題は、現在測定されている雑音の原因を究明 し、それを取り除いていくこと以外にはない。







図 2.6.15: TAMA300 の雑音レベル

# 第3章 TAMA300検出器の要素技術

## 3.1 レーザー

3.1.1 はじめに

極限的な変位感度  $\tilde{h} = 1.7 \times 10^{-22} [1/\sqrt{\text{Hz}}]$  を実現するためには光源に対しても極限的な性能が求められ,特に高出力と高い安定性という相反する性質を両立しなければならない。そのためには安定度が高く制御性のよい高出力レーザーの開発とその制御が必要となる。以下に光源に要求される性能、開発されたレーザー、そしてレーザーに対する周波数・強度の安定化について述べる。

#### 3.1.2 光源に要求される性能

重力波検出用 300m 干渉計に必要とされる光源は波長  $\lambda = 1.06 \mu m$  の Nd:YAG レーザーであり、目標感度  $\tilde{h} = 1.7 \times 10^{-22} [1/\sqrt{\text{Hz}}]$ を実現するために以下の特性が必要とされる。

- (1) 縦横単一モード TEM<sub>00</sub> 発振 (*M*<sup>2</sup> < 1.1)
- (2) 直線偏光(偏光比100:1)
- (3) 出力 30W
- (4) 周波数雑音  $\delta \nu = 5.0 \times 10^{-7} [\text{Hz}/\sqrt{\text{Hz}}] (150 \text{Hz} \sim 350 \text{Hz})$
- (5) 強度雑音  $\frac{\delta I}{T} = 1.0 \times 10^{-8} [1/\sqrt{\text{Hz}}]$

出力要求値は干渉計ビームスプリッタ入射時の値であり、観測帯域の 300Hz 近辺での干渉計の感度を制限する散射雑音限界より決定される。周波数雑音  $\delta\nu$  は干渉計感度  $\tilde{h} \geq \tilde{h} = CMRR \times \frac{\delta\nu}{\nu}$ の関係にあり、CMRRで表されている同相雑音除去比は 300m 干渉計では約 40dB と見積られているので周波数安定度の要求値は  $\delta\nu = 5.0 \times 10^{-7}$ [Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ]となる<sup>1</sup>。また強度雑音  $\delta I/I \geq \nu$ -ザー干渉計の動作点付近での位置揺らぎ  $\delta \tilde{l}$  は 干渉計感度と  $\tilde{h} = \delta \tilde{l} \frac{\delta I}{T} \frac{1}{300}$ の関係式より結び付けられ、 $\delta \tilde{l} = 5.2 \times 10^{-12}$ [m/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ] 程度になると<sup>1</sup>予想されて いるので相対強度  $\frac{\delta I}{T} = 1.0 \times 10^{-8}$  が必要とされる。

#### 3.1.3 注入同期型 Nd:YAG レーザー

レーザー出射後の光学系(モードクリーナを含む)による透過効率(30%)、パワーリサイクリングによるゲ イン(10)を考慮すると、ビームスプリッター入射時に要求されるパワー30Wを実現するためにはレーザー単 体で10W出力が必要となる。また周波数・強度の到達安定度目標を考慮すると無制御時での周波数・強度にも 高い安定度が必要とされる。この高強度、高安定度レーザーは高効率の半導体励起Nd:YAGレーザーと注入同 期により実現された。概略を図3.1.1に示す。従レーザーは半導体レーザー端面励起のリング型Nd:YAGレー ザーであり、熱レンズ・熱複屈折による影響を緩和させるために2本のYAGロッドをファイバー結合された2 台の半導体レーザー(出力各12W)によりそれぞれ別個に励起させている。この従レーザー単体では多モード の双方向発振を行っているがNPROと呼ばれる出力700mWの半導体レーザー励起モノリシック型Nd:YAG レーザー(Lightwave Electronics 社製)を主レーザーとして上記の従レーザーに注入同期を行うことにより 単一方向単一周波数発振 TEM<sub>00</sub> モードで出力10Wが得られた。また従レーザーに対して FM-sideband 法 を用いた位相同期制御を行うことにより安定な注入同期が実現され、数時間にわたり出力変動数%以内が持 続されている。このレーザーシステムはソニー(株)により開発された。現時点での性能を下に示す。

<sup>●</sup> 出力:レーザー出射直後 8.5W(経年変化して減少している。)

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>安全係数 10 を考慮する



図 3.1.1: 10-W 注入同期 Nd:YAG レーザー

- 出力変動は3%以内
- 直線偏光 偏光比 80:1 程度
- $M^2$  **(i** X:1.15, Y:1.28)

#### 3.1.4 レーザーの安定化

3.1.4.1 強度雑音

|観測帯域である  $300\mathrm{Hz}$  における相対強度雑音  $rac{\delta I}{T}=1.0 imes10^{-8}[/\sqrt{\mathrm{Hz}}]$  を実現するためには無制御時の強度 雑音に対して 50dB 以上の雑音抑圧が必要である。この要求値を満たすために電気光学素子 (EOM) と偏光子 で構成された光強度アクチュエーターを用いた強度雑音制御を行った(図 3.1.2)。ウェッジプレート(WP1)に より分岐されたレーザー光をフォトディテクター (PD1) により受光し、得られた強度雑音信号をサーボ回路 を通じて EOM に負帰還制御を行う。また同時に WP1の分岐点より先の点でさらにウェッジプレート (WP2) により光を分岐し、フォトディテクター (PD2) により受光して強度雑音の評価を行っている。得られた強度 雑音スペクトルを図 3.1.3 に示す。縦軸は相対強度雑音であり、点線は無制御時、実線は PD1(制御ループで の強度雑音) 破線は PD2(実際の制御された強度雑音)を示す。実験は最大出力で行い、PD 受光強度は共に  $13 \mathrm{mW}$  で散射雑音レベルは  $rac{I_{shot}}{I} = 5.0 imes 10^{-9} [/\sqrt{\mathrm{Hz}}]$  である。誤差信号スペクトル(実線)は観測帯域であ る  $100 \sim 1 \text{kHz}$  で  $\frac{\delta I}{T} = 3.0 \times 10^{-9} [1/\sqrt{\text{Hz}}]$  に到達している。しかし PD2 で評価した強度雑音スペクトル ( 破 線)は誤差信号より雑音レベルが高く、特に1kHz以下では急激に強度雑音が増加して100Hz付近ではPD1 と比較して 20dB 以上高い。WD で分岐され PD1 に入射する光は、分岐されていない光に対して WP1 分岐 後の光路中の埃による散乱や PD1 入射光の減光に用いられる ND フィルターにより生じた干渉縞の揺れを原 因とする雑音が付加されている。この付加雑音も含めた強度安定化負帰還制御が行われているので、PD2で 受光する光の強度雑音は PD1 で評価される値に比べで悪化していると考えられる。特に上記の現象は低周波 の空気の揺動により励起されているので、空気中の光路をチュープ等で覆うことにより PD2 での強度雑音は向上した。結局 300Hz で  $\frac{\delta I}{T} = 2.0 \times 10^{-8} [\text{Hz}/\sqrt{\text{Hz}}]$ に強度雑音が抑制されている。また上記の強度雑音制御 システムの透過効率は80%であった。

#### 3.1.4.2 周波数雑音

10W レーザーの無制御時の周波数雑音は  $\delta \nu = 3 \times 10^3 \times f[\text{Hz}/\sqrt{\text{Hz}}]$  で近似されるので要求値  $\delta \nu = 5.0 \times 10^{-7}[\text{Hz}/\sqrt{\text{Hz}}]$ を実現するためには観測帯域である 300Hz 近辺において 170dB 以上周波数雑音を抑圧



図 3.1.2: 強度雑音安定化実験図



図 3.1.3: 強度雑音スペクトル 無制御 (点線) PD1(実線) PD2(破線)



図 3.1.4: 周波数安定化サーボ

しなければならない。このような高い周波数安定度を実現するには高安定な周波数基準と高い周波数雑音制 御利得が必要となる。300m 干渉計の腕にある Fabry-Perot 共振器の共振周波数の安定度はレーザーの周波数 安定度要求値  $\delta\nu = 5.0 \times 10^{-7}$  [Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ] 以上が期待されるので、この Fabry-Perot 共振器を最終的な周波数 基準共振器として用いる。ただし共振器の FreeSpectralRange により制御帯域が制限される等の問題により 一段のサーボループでは必要とされる制御利得を得られないので、以下のような 2 段構造の制御ループを構 築する。レーザーはまず 10m モードクリーナを周波数基準として FM-sideband 法により得られた誤差信号 により負帰還制御され、誤差信号評価で  $\delta\nu = 1.0 \times 10^{-4}$  [Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ] まで安定化される。この予備周波数安定 化されたレーザー光を干渉計に入射し、干渉計両腕の共振周波数に対する周波数雑音の同相成分を誤差信号 として検出する。この誤差信号の低い周波成分を 10m モードクリーナの制御に用い、高い周波数成分を前段 のレーザー制御信号に注入する。以上の方法により要求値である  $\delta\nu = 5.0 \times 10^{-7}$  [Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ] を達成する予定 である<sup>2</sup>。注入同期レーザーの周波数雑音は注入同期幅 (Locking Range Frequency) 以下では主レーザーに追 従することが知られており、10W レーザーの注入同期幅が数 MHz 以上であることにより 10W 注入同期レー ザーの周波数安定化は主レーザー光のみの制御により行っている。具体的にはレーザー結晶の温度制御、レー ザー結晶のピエゾ素子による変形、そして電気光学素子 (EOM) による位相制御の併用により 700kHz の制御 帯域を実現している(図 3.1.4)。

現在レーザーは 10m モードクリーナに対して周波数安定化を行い、さらにこの予備安定化された光を用いて干渉計をロックさせてその誤差信号をレーザー、モードクリーナに帰還制御させている。図 3.1.5 にモードクリーナに周波数安定化させた時の誤差信号評価による周波数雑音スペクトルを示す。縦軸が周波数雑音  $\delta\nu$ 、横軸がフーリエ周波数を表し、点線が無制御時、実線が制御時の周波数雑音スペクトルである。制御帯域 700kHz で周波数安定化制御を行いフーリエ周波数 5kHz 以下で周波数雑音 (誤差信号評価)を  $\delta\nu = 2.0 \times 10^{-4}$ [Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ] に抑圧した。モードクリーナー自身の安定度は 300Hz において  $\delta\nu = 1.0 \times 10^{-4}$ [Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ] 以下であると予想できることにより絶対周波数雑音も  $\delta\nu = 2.0 \times 10^{-4}$ [Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ] に達していると考えられおり、モードクリーナ出射時の周波数安定化の結果については 2章 (TAMA300 レーザー干渉計の開発と現状) に譲る。

#### 3.1.5 まとめ

- (1) 注入同期型 Nd:YAG レーザーを作製して単一周波数 TEM<sub>00</sub> モード直線偏光で 10W を得た。
- (2) EOM と偏光子を用いた強度雑音安定化を行い 300Hz において強度雑音を  $\frac{\delta I}{I} = 2.0 \times 10^{-8} [/\sqrt{\text{Hz}}]$ まで 抑圧した。
- (3) 10m モードクリーナと干渉計を用いて要求値である  $\delta \nu = 5.0 \times 10^{-6} [\text{Hz}/\sqrt{\text{Hz}}]$ の周波数安定度を実現 するサーボ系を設計した。

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>周波数制御トポロジーの詳細は 2.3 節(TAMA300 の制御)を参照



図 3.1.5: 周波数雑音スペクトル 点線:無制御、実線:安定化時

(4) 10m モードクリーナに対してレーザーの周波数を安定化して、誤差信号評価で $\delta\nu=2.0\times 10^{-4}[{\rm Hz}/\sqrt{{\rm Hz}}]$ に周波数雑音を抑圧した。

# 3.2 ミラー

超高性能ミラーを実現した技術は,超平滑研磨(superpolish)と超低損失光学薄膜コーティングである.この2つは独立な技術ではなく,例えば通常の光学研磨面に最高レベルのコーティングをすることは不可能である.また,ppmオーダーの表面散乱測定やミラー損失計測が無ければ,重力波アンテナTAMA300(国立天文台三鷹キャンパス内に建設された基線長300mのレーザー干渉計)[3]用ミラーの完成をなかったであろう.以下では,ミラー基板,研磨,コーティングに分けて,その選択と関連した計測を解説する.表3.2.1に示したものが,TAMA300用ミラーの仕様一覧である.

項目	直径	厚さ	曲率	反射率
	(mm)	(mm)	(m)	(%)
モードクリーナ	100	30	平面	99.86
	100	60	15	99.99
300m 光共振器	100	60	$450 \pm 25$	99.99
	100	60	平面	98.80
ビームスプリッタ	150	40	平面	50

表 3.2.1: TAMA300 用ミラーの仕様



図 3.2.1: 懸架装置にインストールされる TAMA300 用ミラー.

#### 3.2.1 ミラー基材

基材に要求されるのは,まず,大口径ということである.レーザー干渉計型重力波アンテナ用ミラーはppm オーダーの低損失でなければならないので,基線長が数kmのファブリーペロー共振器の回折損失を考えれ ば,直径数十 cm が必要である.また機械的なQ値を上げるために,形状としては直径と厚さが同程度(ア スペクト比1:1)に選んである.しかも,基板中の散乱・吸収・屈折率揺らぎが非常に小さいことが必須なの である.さらに,極限的な研磨に適していなければならない.これらの条件を満たす基材は多くなく,現実 的には合成石英とサファイアだけとなる.レーザー干渉計の雑音解析が進むにつれて熱雑音が深刻であるこ とがわかってきたので,将来的には機械的Q値が高いサファイア(しかも低温に冷却する)が有望であるが, 現在は全ての重力波アンテナで合成石英がミラー基材として採用されている.合成石英は,光損失に関して は光ファイバ,また屈折率揺らぎに関してはステッパ用レンズを例にとれば,その高性能さは一目瞭然であ る.もちろん,全ての使用目的に対して万能であることは難しいので,使う人間が自分の目的に最適の合成 石英を選択する必要がある.

TAMA300 用ミラー基板の形状は,熱雑音を考慮して直径 10cm,厚さ 6cm と決められた.予想される回折 損失は 1ppm 以下である.この形状の合成石英では,最低次の機械的共振周波数が 28kHz,Q 値が約 10<sup>6</sup> で あることが報告されている [4].基板の厚さを  $\ell$ ,屈折率揺らぎを  $\delta n$  とすれば,透過したときに波面は  $\ell \delta n$  程 度崩れていることになる.これが  $\lambda/10$  以下になるという条件から  $\delta n < 10^{-6}$  であることが要求される.我々 は,この要求を充分満たしているものとして,ステッパ用レンズに使われる合成石英を選定した.実は OH 基がさらに少ない,つまり赤外の吸収がさらに小さいもの(数 ppm/cm)も存在するが [5],この時点では最 善の選択であると判断した.リサイクリングによって等価的な光パワーが上がると吸収による熱レンズ効果 が起きるが,TAMA300 の初期段階では問題にならないであろう.実際の基材の吸収は,重力波分野では主 にミラージュ法 [5] と言われる方法で測定されてきた.これを簡単に説明すると,吸収による基材の温度上昇 が引き起こす屈折率歪を,そこを通過するプローブ光の曲がりから見積もるというものである.精度は非常 に高いと報告されているが,個人的には,もっと直接的な測定(温度上昇を直接測る)を試行して,温度分 布を 3 次元計測する段階にきたのではないかと思っている.

さて将来有望なサファイアであるが,実際にはミラー基板としては使いづらい点がある.光軸,複屈折, レーリー散乱,大口径のものがない等である.これらについては精力的な研究が進んでおり,合成石英と同 程度に使えるようになることが期待される.測定についての現状は,結晶中に含まれる不純物(クロム等)に よる吸収の測定に着手したところである.

#### 3.2.2 基板の研磨

研磨によって作られる鏡面に関する要求は,ファブリーペロー共振器内にフォトンを充分蓄えることがで きるほど球面形状が優れており,かつ,表面散乱が無視できるほど平滑なことである.前者に関しては,仏 伊共同計画 VIRGO(基線長 3km)で先鞭がつけられ,米 LIGO(基線長 4km)計画で進展した FFT 光学シ ミュレーションにより詳細に解析されてきた.これは FFT を用いた光伝播シミュレーションであり,実際の 表面形状を入力してレーザー干渉計の性能がどれほど劣化するかを評価するものである.その結果得られた 表面形状の許容値は非常に厳しい値であるが,TAMA300のように曲率半径が 1km 以下の場合には, $\lambda$ /20 程 度で充分だと考えている.つまり,要求される球面形状誤差は,直径 d,曲率半径 Rの球面の中心部の窪み  $s(=d^2/8R$ , TAMA300の場合は約 3 $\mu$ m)に応じたものになるということである.

形状誤差については専らフィゾー干渉計で測定されており,通常は基準面(原器)の精度で測定限界が決まっている.LIGO計画では,まず $\lambda/100$ 以上の精度を持つ基準面を製作し,それを用いて高性能フィゾー 干渉計で測定している.TAMA300用ミラーの基板は,全てLIGOと同様の装置で測定されており,平均で  $\lambda/40$ 程度の性能を確認している[6].図3.2.2 は,この測定装置で計測されたTAMA300用ミラー基板の表面 形状を256×256メッシュに変換したものである.これを用いてFFTシミュレーションを行い,鏡面形状の 乱れによるコントラストの悪化(図3.2.3)という観点では,TAMA300の目標感度が達成可能であることを 確認した.

また,後者に対しては,リングレーザージャイロ用ミラーに使われるような超平滑研磨(superpolish)が必須となるが,鏡面散乱を防ぐためというよりは,寧ろ高性能コーティングを実現するために必要と考えられるようになってきた.実際にLIGO計画では,表面粗さ6Årmsが許容値とされており,1Årms以下のsuperpolish面よりは緩やかな制限となっている.この表面粗さでは全散乱(Total Integrated Scattering)

$$TIS = \left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda}\right)^2$$

が 50ppm 程度となるが,それよりは形状誤差が大事なのである.しかし,もしかするとこの表面粗さでは, コーティングに対する問題が起きるかもしれない.例えば,点欠陥ができやすくなるという意味である.

表面粗さは,触針式や光学式(干渉計)の測定器,そして AFM 等で測定されているが,通常は触針式測 定器のデータで比較されることが多い.ここで,コーティングの前後での測定例を図 3.2.4 に示しておく.また,TIS を積分球で直接測定することにより表面粗さを見積もる方法も有効である(図 3.2.5 参照).

現在ミラー性能を決めているのは,何と言ってもコーティング技術である.これについては,リングレー ザージャイロ用ミラーをはじめとする高性能光学素子を製作するためにノウハウが蓄積されてきた.現在は 欠陥が直径 8cm の領域にわずか一つというものができるようになっている[7].このような高性能薄膜はイオ ンビーム工学の発展の賜物である.国立天文台でも,イオンビームスパッタ装置を導入して,高性能薄膜の



図 3.2.2: 高精度フィゾー干渉計により測定した TAMA300 用ミラー基板の表面形状データ. 研磨面の形状誤 差が基準面の精度 (PV 値  $\lambda/40$  以下)に近いことがわかる.



図 3.2.3: 表面形状データを入れて FFT シミュレーションした結果.干渉計のダークポートに漏れてくる光 強度を示したもの.



図 3.2.4: 触針式表面粗さ計による superpolish 面の測定例.



図 3.2.5: 積分球型散乱計による superpolish 面の測定例.

研究に着手した.目的は,すばる望遠鏡に装着する天文観測機器用のレンズやフィルターやレーザー干渉計型重力波検出器用ミラーの研究を行うことである.既にこの装置は定常的に稼動しており,広帯域反射防止コーティング等で成果を出しつつある.膜厚制御が鍵となる広帯域反射防止コーティング例(図3.2.6)から明らかなように,イオンビームスパッタ法では膜厚誤差が非常に小さく(Åオーダーの制御が可能),重力波検出器のように反射率を高精度(4桁程度)に設定する必要がある場合には圧倒的な利点となるのである.また,この利点を活かして反射率制御を精密に行えるように,誘電体膜の屈折率を評価する方法を考案した[8].



図 3.2.6: イオンビームスパッタ装置による広帯域反射防止コーティングの製作例(17層). 点線はデザインで,実線が実測値を示す. 膜厚制御がかなり精度良く行われていることがわかる.また,再現性は非常に良い.

LIGO, VIRGO および TAMA300 というレーザー干渉計用のミラーは,全てイオンビームスパッタ装置で コーティングされている(イオンビームアシストを併用しているものもある).そこではノウハウを重視す るために専らカウフマン型のイオンガンが使われてきたが,フィラメント不要という意味で将来性の高い RF イオンガンも実用段階に入っている.高反射ミラーは,光学膜厚が $\lambda/4$ の低屈折率膜と高屈折率膜を交互に 積み重ねて製作されるが,重力波で必要となる反射率 99.99%以上の場合,膜物質として Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> と SiO<sub>2</sub> のペ アを選べば,総膜数は 30 層を超えることになる(図 3.2.7 参照).このような場合,途中でフィラメント交 換しなくても良い RF 型が最終的には有利なのである.確かに論文報告されている最も低損失(1.5pm)な ミラー [11] はカウフマン型イオンガンでコーティングされている.一方,RF 型イオンガンの場合,膜欠陥の 発生やビームの均一性といった問題があり,カウフマン型の場合のような高品質な光学薄膜が当初は得られ なかったが,損失測定結果を成膜工程へフィードバックすることで,RF 型イオンガンでも反射率 99.9967%, 損失 4.8ppm のミラー [12] が製作できるようになった.以下には,その損失測定を紹介する.

## 3.2.4 ミラー損失の測定

#### 3.2.4.1 共振器特性の測定法

作製されたミラーついて分離すべきパラメータは、反射率(R)、透過(T)、損失(A)、の3つである.これ らの量を分離するためには、Fabry-Perot(FP)共振器を評価対象ミラーで構成し、そのフィネスと共振器の 透過効率を測定することにより行なう.これは、測定対象が反射率 99.99 %以上で、なおかつ損失が ppm 程 度であり、これらの値を高精度に直接測定することは不可能なためである.共振器を組むと測定感度はフィ ネス倍だけ増幅され、それぞれのパラメータを高精度に分離することが可能となる.ただし、この場合共振 器の安定度や光源の安定度が非常に重要となってくる、99.99 %以上の反射率をもつミラーで共振器を構成し た場合、その共振線幅は数 10kHz 以下であり、その共振器内光子寿命は µs 以上となる.したがって、使用 するレーザーの線幅は十分に狭窄化されている必要がある、測定法によっては線幅を数 Hz まで狭窄化した光 源を用い測定精度の向上に努めている.現在、測定時に構成している共振器の長さは 200 mm であり、これ は共振器の安定性と光子寿命の二つより決めた長さである.共振器長を 200 mm としたとき、反射率が 99.99 %以上になったとき、その測定感度は急激に向上する.フィネスの測定法として、AM サイドバンド法、伝



図 3.2.7: ミラーの膜数と透過率の関係. Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> でコーティングする場合.

達関数測定法 [9],リングダウン法 [10]の3種類を開発した.AMサイドバンド法は周波数マーカーとして、 入射光に強度変調をかけ、同時にレーザーの発振周波数を掃引する.このとき得られる、二つのサイドバン ドのピークをマーカーとして、共振器の透過曲線から共振線幅を求めフィネスを決定する. この方法はレ ザーの強度変化の影響を受けないが,使用するレーザーの線幅が共振器の線幅に比べ十分に狭窄化されてい る必要がある.また,超高フィネスの共振器の場合,その共振器内の光子寿命の影響により実際の共振線幅 よりも広くなる.共振器伝達関数測定法は,共振器にレーザー光を安定化し,その光に強度変調をかけ,強度 変調の変調周波数を掃引して共振器の透過伝達関数を求める.レーザーは常に,共振器の共振周波数にロッ クされているため、非常に高精度に共振線幅を求めることができる、現在、この測定の測定限界を与えてい るのは, FFT アナライザーの分解能である.共振器が不安定である場合は透過光強度が変化し,結果として 正しい伝達関数が求められない、したがって共振器が十分に安定であることが必要である、リングダウン法 は共振器内部に光が蓄積された状態の時に入射レーザーを切り,その時の共振器出射光の減衰時間を観測す る.この方法は観測時間が  $\mu s$  程度であり,外乱の影響を受けにくい.しかしレーザーの遮断時間や検出器の 応答速度が十分でない場合,得られる値は実際の性能より良くなる可能性がある.透過と損失の分離は共振 器の透過効率より求める.透過効率は $P_{
m out}/P_{
m in}=T^2/(A+T)^2$ で与えられる.ここで $P_{
m in}$ は共振器に入射し ている光パワー,Poutは共振器を透過する光パワーである.したがって,共振時の光透過を測定すれば,損 失と透過を分離することができる.しかし,最大透過パワーを得るためには,レーザーの周波数が十分に長 い間共振点に止まっていなければならない.そのため,透過パワーを測定する場合は共振器にレーザー光が 安定化されている必要がある.特に高透過率,高反射率ミラーの場合,レーザー安定化時と非安定化時では, 透過パワーにして 10%程度の差を生ずる.

#### 3.2.4.2 超高品質ミラーの2次元性能評価

共振器を用いてミラーの評価を行なった場合得られる値は、2つのミラーの性能の平均値である.実際に ミラーを使用する場合、常に同時成膜した2枚を1組として使用するわけではない.したがって、ミラー性 能の2次元分布及び1枚のミラー当たりの性能を知る必要がある.ただし、99.99%といった値を共振器を用 いた時と同じ精度で測定する方法はなく、共振器を用いて得られる値をなんらかの方法で1枚当たりの値に 分離する必要がある.ミラーの反射率分布を求めるには、1枚のミラーを参照ミラーとし、別のミラーを動 かして反射率分布を求めればよい.ミラー性能の2次元評価を行なうには、ミラーをスキャンするための機 構が必要となる.そのため、ミラーをスペーサーの両端に固定することができないので、共振器の安定性が 失われる.アルミロッドの両端にミラーを固定した場合、片側のミラーを自立型のミラーホルダーに装着し た場合、両側のミラーをミラーホルダーに装着した場合の3つの状態の共振器に、同一のサーボ回路でレー ザーをロックした場合の周波数安定度を示したのが図3.2.8 である.アルミロッドの場合に比べ1枚のミラー をミラーホルダーに装着した場合は1桁、2枚のミラーをミラーホルダーに装着した場合は3桁、安定度が劣 化しているのが分かる.20kHz付近で一旦すべての安定度が一致しているのは、共振器の応答のためである.
共振器に持ち込まれるノイズが白色雑音である場合,周波数安定度は2つの状態で1桁づつ悪化するはずで あるが,1枚のミラーをミラーホルダーした場合と2枚のミラーをミラーホルダーに装着した場合では2桁 の周波数劣化がみられる.これは共振器を構成するミラー間に持ち込まれているノイズが相関を持っているた めと考えられる.共振器の安定度が低下した状態では,共振器の伝達関数やAMサイドバンドでフィネスを 求める事は不可能である.しかし,リングダウン法は測定時間が $\mu$ sと短く,この時間内で共振器が安定とみ なせると仮定すれば測定可能である.共振器が安定であるかどうかを知るためには,実際に測定を行い,そ の波形が単一時定数となっている事を確認すればよい.図 3.2.9 に2つのミラーホルダーで共振器を構成した 場合の計測波形例を示す.波形は単一時定数で減衰しており,計測時間において共振器が十分に安定である 事を示している.図 3.2.10 はミラーの反射率面分布について測定を行なった結果である.測定は,5×5 mm で 0.5 mm 毎に行なっている.反射率の平均値は99.9780%でありその分散は8 ppmであった.このミラー はカウフマン型イオンビーム・スッパッタリング(IBS)装置で作製された.この計測系の測定誤差は5 ppm ほどであり,それに比して顕著な反射率面分散は認められなかった.この計測の反射率は共振器を構成する 2枚のミラーに対する値であり,1枚当たりの反射率面分布を求める必要がある.共振器を構成するミラー の反射率を1枚毎に求めるためには,新たに1枚のミラーを加えすべてのミラーの組み合わせについての反 射率を求めればよい.この時,それぞれのミラーの振幅反射率をr1,r2,r3,計測により求めた r1r2,r1r3, r2r3の組み合わせに対する反射率をa,b,c,とすると.それぞれのミラーに対する反射率は

$$r_1 = \sqrt{\frac{ab}{c}} \tag{3.2.1}$$

$$r_2 = \sqrt{\frac{ac}{b}} \tag{3.2.2}$$

$$r_3 = \sqrt{\frac{cb}{a}} \tag{3.2.3}$$

で与えられる.今回実験に用いたミラーの曲率は,平面1枚( $M_1$ ), R=1000 mmの球面鏡が2枚( $M_2$ , $M_3$ )である.共振器長は $M_1M_2$ , $M_1M_3$ の組み合わせに対し200 mm, $M_2M_3$ の組み合わせに対し400 mmである. $M_2$ については,一旦ミラーを取り外す必要があるため,ミラーの反射率面分布を測定しておく必要がある。今回測定を行なったそれぞれの組み合わせに対するミラーの反射率と,各々のミラーの反射率を表3.2.2に示す.この測定をおこなったミラーは,1枚毎の反射率が分かっており,反射率基準ミラーとなる.これらのミラーのうち1枚を参照ミラーとし,未知の反射率を持つミラーと組み合わせて共振器を組み,反射率面分布の測定を行なえば,1枚のミラーについての値を知ることができる.その測定結果を図3.2.11に示す.測定領域は5×5 mmで測定は0.5 mm毎に行なっている.反射率の平均値は99.9915%であり分散は15 ppmであった.このミラーは,RF型イオンガンで作製された.RF型では,同時成膜サンプルにおいても0.5%程度反射スペクトル中心がばらつくことが確認されており,屈折率にばらつきあると考えられる.このような効果の影響により,カウフマン型よりも若干大きな反射率面分布が"現状"では生じている.もちろん,これらはコーティング条件を最適化することで,近い将来解決されると期待できる.

				$r_{1}r_{3}$	$r_2r_3$	
Cavity life time $(\mu s)$		$5.973\pm0.17$	74 5.8	$51 \pm 0.465$	$12.158\pm0.822$	
Reflectance		$0.999892\pm3\mu$	opm 0.999	$886 \pm 5 \mathrm{ppm}$	$0.999890\pm7\mathrm{ppr}$	n
		$R_1$	$R_2$		R <sub>3</sub>	
Reflectar	nce 0.999	$9884 \pm 16 \mathrm{ppm}$	$0.999893 \pm$	16ppm 0.	$999880 \pm 24 \mathrm{ppm}$	•

 ${\bf \ensuremath{\overline{z}}}$  3.2.2: The reflectance of  $r_1r_2,r_1r_3,\,r_2r_3,\,R_1,\,R_2,\,{\rm and}\,R_3.$ 

### 3.2.4.3 大口径ビームに対するミラーロス

最後に国立天文台の基線長 20m のレーザー干渉計で行った測定について報告する.この干渉計は重力波検 出器のプロトタイプであり,数々の光学デザインを実証してきた高性能なものである.今回は,1cm 程度の 大きなビーム径に対するミラー損失測定に使用したのである(図 5.2.4 参照).測定において最も苦労したの は,真空タンク内にミラーを設置する際,如何にミラーを汚すことなく作業を行うか,ということであった. 結局は真空タンクをビニールテントで覆い,N2 ガスを流しながら手早く作業を行うことで実現したのである が,タンクの開閉に数人を要する環境での作業は厳しいものであった.さらに,長さが 20m もあり,フィネ



図 3.2.8: Pound-Drever-Hall 法により FP 共振器にロックされたレーザーの周波数安定性.アルミロッドの 両端にミラーを固定した場合,片側のミラーを自立型のミラーホルダーに装着した場合,両側のミラーをミ ラーホルダーに装着した場合を比較している.



図 3.2.9: リングダウン法で測定した光子寿命.共振器の安定性は光子寿命に比べて充分長い.



図 3.2.10: カウフマン型イオンガンで製作されたミラーの反射率の 2 次元マップ. 5×5 mm の領域を 0.5 mm ステップで測定しており,平均反射率は 99.9780%,標準偏差は 8 ppm である.



図 3.2.11: RF イオンガンで製作されたミラーの反射率の 2 次元マップ. 平均反射率は 99.9915% ,標準偏差 は 15 ppm である. スも 25,000 と高い(光子寿命は 1msec を越える!)ファブリーペロー共振器の測定は,地面振動が落ち着く 深夜に行われた.得られたデータを図 3.2.13 に示す [6].ここからミラー損失は約 30ppm と見積もられたが, 驚くべきことに,この値は小さなビーム径で別に測定したミラー損失の 2 次元マッピング [15](図 3.2.14 参照)の平均値と良く一致したのである.つまり,このスケールまでは波面乱れ等による損失は効いていない ということであり,ミラー性能は鏡面形状(研磨)ではなくコーティングで決まることが確認されたことに なる.



図 3.2.12: 基線長 20m のレーザー干渉計を用いたミラー損失測定のブロックダイアグラム.レーザー出射光 を,長さ 4m の光共振器でモードクリーニングしているため,高次モードの影響はほとんど無い.



図 3.2.13: 基線長 20m のレーザー干渉計で測定した共振器の周波数応答.これよりフィネスは約 25,000,反 射率 99.9875%,損失 28ppm となる.

### 3.2.5 むすび

レーザー干渉計型重力波検出器 TAMA300 用ミラーの開発の道程を解説した.世界でも最高レベルの大口 径超低損失ミラーは,日本航空電子工業(株)中央研究所と TAMA プロジェクト光学グループ(国立天文台, 電気通信大学レーザー極限技術研究センター,東京大学)の共同研究として実現した.



図 3.2.14: ミラー損失の 2 次元マッピング. 全体の平均値は 40ppm であるが, 特異点を除くと 27ppm となる. 測定時のビーム直径は 0.6mm である.

# 参考文献

- [1] 中村卓史,三尾典克,大橋正健編:重力波をとらえる(京都大学学術出版会,1998)
- [2] 植田憲一: 応用物理 67, 513 (1998).
- [3] 三尾典克: 応用物理 66, 939 (1997).
- [4] N. Ohishi, K. Kawabe and K. Tsubono: Gravitational Wave Detection, 369 (Universal Academy Press 1997).
- [5] P.Y. Baures and C.N. Man, Optical Materials2, 241 (1993).
- [6] 渡邊晃司,中村憲司,伊藤和彦,江藤和幸,渡邊昌彦,北島直哉:航空電子技報22,62(1999).
- [7] 潟岡泉, 伊藤和彦, 関根啓一, 江藤和幸, 西田恵美子: 応用物理 66, 1345 (1997).
- [8] S. Miyoki, S. Sato, M. Ohashi and M.-K. Fujimoto, Opt. Rev. 5, 17 (1998).
- [9] N. Uehara, K. Ueda, Appl. Phys. B61, 9 (1955).
- [10] N. Z. Anderson, J. C. Frisch, and C. S. Masser, Appl. Opt. 23, 1238 (1984).
- [11] A. Ueda, N. Uehara, K. Uchisawa, K. Ueda, H. Sekiguchi, T. Mitake, K. Nakamura, N. Kitajima and I. Kataoka, Opt. Rev. 3, 369 (1996).
- [12] 上田暁俊, 植田憲一, 佐藤修一, 三代木伸二, 大橋正健, 伊藤和彦, 渡邉晃司, 中村憲司, 北島直哉, 潟岡泉: レー ザー研究 27, 116 (1999).
- [13] 上田暁俊, 植田憲一: 光学 27, 530 (1998).
- [14] S. Sato, S. Miyoki, M. Ohashi, M.-K. Fujimoto, T. Yamazaki, M. Fukushima, A. Ueda, K. Ueda, K. Watanabe, K. Nakamura, K. Etoh, N. Kitajima, K. Ito and I. Kataoka, Applied Optics 38 No.13 (1999).
- [15] A. Ueda, H. Yoneda, K. Ueda, K. Waseda, and M. Ohashi, Laser Physics 8, 697 (1998).



図 3.3.3: 分割型光検出器の回路図

図 3.3.2: 光電流制限回路

# 3.3 光学要素

レーザー干渉計型重力波検出器では、大出力のレーザー光を扱うので、通常の光学系に比べて、制限が多い。特に、光検出器、光学結晶などに注意する必要がある。

# 3.3.1 光検出器

レーザー光の波長は約 1  $\mu$ m なので、使用できる光検出器は InGaAs タイプのものである。TAMA300 では 浜松フォトニクス社製の G3476-10 (口径 1mm)を使用した。

実際には、この光検出器で受光できる光の量は限界があるので、ビームスプリッターを利用して、4つの フォトダイオードで分割受光するものを作った。その概念図を図 3.3.1 に示す。それぞれのフォトダイオード は入射光に対してすべて同じ光路長を持つように配置し、レンズで集光する場合にすべて同等になるように 設計されている。また、光軸と垂直な面内での位置は微動機構により調整が可能になっている。

さらに、光源の出力は非常に大きいので、過大入力に関する保護を考えないといけない。フォトダイオードの損傷は、入射光自身の強さよりもそこで消費される電力で発生する熱によって生じると考えられる。この消費電力は、ほとんどの場合に応答速度を改善するためのバイアス電圧と光電流の積で与えられる。このG3476の定格バイアス電圧は5Vであるので、10mAの電流を取り出すと50mWの電力が消費される。規格表には最大消費電力は記されていないが、およそ100mWのレベルと考えれるので、4個の合計の電流値を100mAに制限するバイアス回路を付加した。その回路図を図3.3.2に示す。このような制限回路をつけたフォトダイオードは1個あたり2W程度のレーザー光を入射しても破壊されなかった。しかし、かなりの発熱を伴うので、将来の検出器ではフォトダイオードの冷却を考慮しないといけないだろうと思われる。また、電気雑音が問題になるので、低雑音広帯域のOPアンプ(MAX4106)を利用した回路を設計した。その回路図を図3.3.3に示す。1台の検出器でも受光できないくらいの光を扱う場合には、外部で光を分割して検出することになる。

## 3.3.2 電気光学結晶

光干渉計を稼動させる時、鍵となるのが光に変調をかける技術である。特に、位相変調技術は不可欠で、良 好な変調特性を得るためには良質の電気光学結晶が必要である。現在、もっともポピュラーな結晶は LiNbO<sub>3</sub> (LN)である。しかし、この結晶は、不純物により発生するフォトリフラクティブ効果が大きく、高い出力の レーザー光に対しては、変調能率が低下したり、変調ができなくなるという欠点が指摘されていた。そこで、 LN 以外の結晶として、KTiOPO4(KTP)と RbTiOAsO4(RTA)という結晶(おもに非線形光学素子として開 発された結晶)について、変調器としての特性を調べた。その際、結晶の電気光学効果の大きさを表すポッケ



図 3.3.4: LN のポッケルス係数 r<sub>33</sub>

ルス定数 r<sub>33</sub>の測定を行った。LN に対する測定結果を図 3.3.4 に示す。

また、電気光学効果による位相の変化量は  $\Delta \phi \propto n_3^3 r_{33}$  の関係 ( $n_3$  は変調電場方向の屈折率)と表される ので、変調器としての性能をあらわすパラメータ  $n_3^3 r_{33}$  を表 3.3.3 にまとめた。なお、 $r_{33}$  の値の幅は、測定 された周波数 (100kHz-10MHz) での違いを表す。この表からわかることは、やはり LN の性能が非常に優れ ているということである。しかも、結晶成長技術の進歩で LN に関しては高純度の結晶が得られるようになっ てきている。そこで、実際に 10W レーザーを用いでテストを行ったところ、LN でも十分使用可能であることがわかった。そこで、TAMA では LN をベースにした電気光学変調器を用いている。しかし、さらに高出 力 (100W を超えるような)の場合には、RTA などの結晶を用いる必要があるだろう。

表 3.3.3: 電気光学結晶の特性と性能指数

結晶	$r_{33} \; [\mathrm{pm/V}]$	$n_3$	$n_3{}^3r_{33} \; [{\rm nm/V}]$
LN	$28\sim 26$	2.15	$0.28\sim 0.26$
RTA	$34 \sim 25$	1.89	$0.23\sim 0.17$
KTP	$22 \sim 19$	1.84	$0.14\sim 0.12$

# 3.4 モードクリーナー

### 3.4.1 概要

モードクリーナーの変調透過に伴う強度ノイズを除去し、モードクリーナー透過光がショットノイズレベル を達成した。レーザー干渉計を動作点に保つために位相変調光が必要であり、それを生成する位相変調器を モードクリナーの前に置くためには、位相変調光がモードクリーナーをできる必要がある。これを実現する ために、モードクリーナーの共振線の間隔、Free Spectral Range (FSR)を位相変調周波数に一致させる必要 がある。しかしながら、この方法で位相変調光を透過させたとき、モードクリーナー透過光に変調周波数付 近の強度ノイズが現れることが確認されていた。その強度ノイズのメカニズムがモードクリーナー共振線に 対する相対的レーザー周波数ノイズと位相変調周波数のFSRからのずれのコンボリューションに起因するこ とつきとめ、実際にこれらを除去することに成功した。

## 3.4.2 変調透過型モードクリーナーの開発

TAMA300 は基線長 300m のレーザー干渉計型重力波検出器で、国立天文台三鷹キャンパスに建設されて いる。検出器のタイプはパワーリサイクリングを組み込んだファブリー・ペローマイケルソン干渉計である。 レーザーは最大出力 10W の注入同期レーザーである。モードクリーナーはレーザーと干渉計の間に置かれ、 3 枚鏡で構成された光共振器である。モードクリーナーの共振基調は約 9.8m で、フィネスは 1700 である。 モードクリーナーを構成する 3 枚の鏡は干渉計の鏡と同様に、それぞれ独立に振り子に吊られ、真空中に置 かれている。モードクリーナー用真空チェンバーは2 つで、一方に 2 つの鏡が 20cm の距離を隔てて配置さ れている。この真空チェンバーは真空パイプによって、もう一方のモードクリーナー用真空チェンバー、お よびリサイクリング用真空チェンバーと接続されている。モードクリーナーの主な役割はレーザービームの 波面の整形とビームジッターノイズの除去で、共振器の横モード選択性によって、これらを行っている。ま た、レーザー周波数の安定化も担っている。このモードクリーナーは干渉計を動作点に保つための位相変調 光を透過させる必要がある。なぜなら、位相変調器はレーザービームの波面を乱し、ビームジッターノイズ を増加させる可能性が大きいため、モードクリーナーの機能を損なわないためには、位相変調器をモードク リーナーの前に置く必要があるからである。

### 3.4.3 位相変調透過

#### 3.4.3.1 共振器制御

モードクリーナー共振器を動作させるために、Pound-Drever 法を用いる。この方法は、入射レーザービー ムに位相変調により変調をかけ、モードクリーナー共振器からの反射光を光検出器で検出し、その信号を変 調周波数で復調する。復調信号はモードクリーナー共振器の共振周波数とレーザー周波数との誤差信号であ り、それをレーザー周波数制御(もしくは、共振器長制御)へフィルターを用いてフィードバックする。干 渉計も動作点に保つために同様の Pound-Drever 法を用いている。それゆえ、位相変調器は、モードクリー ナー用と干渉計用との2つが必要となる。

### 3.4.3.2 サイドバンド透過

位相変調器で生成されたサイドバンドは、共振器の共振線幅より高い周波数の場合、共振器を通過することはできない。しかし、位相変調周波数が、共振器の共振ピーク間隔 FSR に等しい場合、サイドバンドは共振器を透過することができる。キャリヤーとサイドバンドはそれぞれ異なった共振ピークで透過する。FSR は次式に従う。

$$\nu_{\rm FSR} = \frac{c}{2\ell},\tag{3.4.4}$$

ここでcは光速、 $\ell$ は共振器長である。

#### 3.4.3.3 透過光強度ノイズ

始めに国立天文台の 20m プロトタイプ検出器のモードクリーナーで位相変調光を透過させる実験を行った。 20m プロトタイプのモードクリーナーは共振器長 3.75m なので、透過位相変調周波数は 40MHz である。そ の実験で、モードクリーナー出射光に、入射光には無い、強度ノイズが付加されることがわかった。モード クリーナー透過光を光検出器で検出し、変調周波数で復調し、その復調信号のフーリエ解析を行った。その 結果はモードクリーナー制御信号のフーリエスペクトルとは、異なったものであった。モードクリーナー透 過光復調信号のスペクトルは、1kHz以上では、予想されるショットノイズレベルとなっていたが、それ以下 の周波数では、ショットノイズレベル以上の強度ノイズが現れていた。この透過光強度ノイズレベルは、位相 変調周波数に依存することがわかったが、最適な周波数のときで、ショットノイズレベルより10dB高い値で あった。

# 3.4.4 ノイズメカニズム

### 3.4.4.1 FM ノイズと FSR ノイズ

モードクリーナー透過光の強度ノイズは FM ノイズと FSR ノイズの両方によって、位相変調が強度変調に 変換されることで生じると我々は考えた。ここで、FM ノイズとはレーザー周波数と共振器の共振ピークと の差のノイズで、FSR ノイズとは位相変調周波数と共振器の FSR との差のノイズである。もし、FM ノイズ のみで、FSR ノイズが無いとき、すなわち、位相変調周波数と FSR が完全に一致しているとき、モードク リーナー透過光で位相変調が強度変調に変換することはない。なぜならば、キャリヤー、サイドバンドは同 じ強度、位相の変化を受けるからである。もし、FSR ノイズのみで、FM ノイズが無いとき、このときも位 相変調が強度変調に変換することはない。このとき、キャリヤーは全く変化を受けず、周波数の高いサイド バンドと低いサイドバンドは、キャリヤーに関して鏡像対称な変化を受けるからである。しかしもし、FM ノ イズと FSR ノイズの両方がある場合、強度変調が生成されてしまう。この場合、キャリヤーは FM ノイズの 影響のみを受ける。高いサイドバンドは両方のノイズの影響を FM + FSR の受け、低いサイドバンドは FM - FSR で受ける。キャリヤー、高いサイドバンド、低いサイドバンドはそれぞれ、異なった影響を受けるた め、位相変調が強度変調へと変換され、モードクリーナー透過光に強度ノイズとなって現れるのである。

### 3.4.4.2 FM ノイズと FSR ノイズのコンボリューション

FM ノイズと FSR ノイズの両方がある時、透過光復調信号の強度ノイズは次式のようになる:

Inphase : 
$$-16 \, m \mathcal{F}^3 \, \frac{\Delta \nu_{\rm FM}}{\nu_{\rm FSR}} \left(\frac{\Delta \nu_{\rm FSR}}{\nu_{\rm FSR}}\right)^2$$
, (3.4.5)

Quadrature – phase : 
$$-4m\mathcal{F}^2 \frac{\Delta\nu_{\rm FM}}{\nu_{\rm FSR}} \frac{\Delta\nu_{\rm FSR}}{\nu_{\rm FSR}},$$
 (3.4.6)

$$\frac{\Delta\nu_{\rm FM}}{\nu_{\rm FSR}} \ll 1 \quad \text{and} \quad \frac{\Delta\nu_{\rm FSR}}{\nu_{\rm FSR}} \ll 1,$$
(3.4.7)

ここで、 $\mathcal{F}$ は共振器のフィネス、mは変調度、 $\nu_{\text{FM}}$  FM ノイズ、 $\Delta \nu_{\text{FSR}}$  FSR ノイズ、 $\nu_{\text{FSR}}$  共振器の FSR である。Inpahse 復調は変調周波数と同位相で復調、Quadrature-phase 復調は 90 度ずれた位相で復調する ことである。Quadrature-phase 復調信号の式は  $\Delta \nu_{\text{FM}}$  と  $\Delta \nu_{\text{FSR}}$  のコンボリューションで透過光強度ノイズ が現れることを示している。 $\Delta \nu_{\text{FM}}$  と  $\Delta \nu_{\text{FSR}}$  の DC 成分が実際大きいので、透過光強度ノイズの周波数 f は次式が主となる:

$$\left(\Delta\nu_{\rm FM}\right)_{\rm DC} \times \delta\left(\Delta\nu_{\rm FSR}\right)_f + \delta\left(\Delta\nu_{\rm FM}\right)_f \times \left(\Delta\nu_{\rm FSR}\right)_{\rm DC} \quad , \tag{3.4.8}$$

ここで  $()_{DC}$  は DC 成分を、  $\delta()_f$  は周波数 f の成分を現す。

#### 3.4.4.3 強度ノイズ除去

式 (3.4.8) より、4 つの項を取り除けば透過光強度ノイズを低減させることができる。 $\delta \left( \Delta \nu_{\rm FM} \right)_f$ はモード クリーナーを動作させるためのフィードバック制御の制御ゲインを上げれば良い。 $\delta \left( \Delta \nu_{\rm FSR} \right)_f$ は位相変調 周波数にシンセサイザーなどの安定な発振器を使う。この実験では、 $\left( \Delta \nu_{\rm FM} \right)_{\rm DC} \mathcal{E} \left( \Delta \nu_{\rm FSR} \right)_{\rm DC}$ を減少させ、 透過光強度ノイズを低減させた。

レーザー周波数に周波数  $f_0$ の周波数変調を加え、Quadrature-phase 復調信号の周波数  $f_0$ 成分の大きさが最小になるように $(\Delta \nu_{\text{FSR}})_{\text{DC}}$ を調整する。同様に $(\Delta \nu_{\text{FM}})_{\text{DC}}$ も調整することによって、透過光強度ノイズをショットノイズ以下に抑える。

# 3.4.5 強度ノイズ除去の実験

### 3.4.5.1 実験装置



☑ 3.4.1: Experimental Setup for Sidebands Transmission.

図 3.4.1 は TAMA300 モードクリーナーでの透過光強度ノイズを抑制する実験のセットアップである。位相変調器はモードクリーナーを動作させるための 12MHz と、モードクリーナーを透過させ、干渉計を動作させるための 15.25MHz の 2 つがある。 $(\Delta \nu_{\rm FSR})_{\rm DC}$ を制御するために、30kHz でレーザー周波数に周波数変調をかける。モードクリーナー透過光は光検出器で検出し、位相変調周波数 (15.25MHz) で復調する。Quadrature-phase 復調信号は、レーザー周波数変調の 30kHz で更に復調する。その誤差信号を位相変調周波数を発振している電圧周波数可変水晶振動子 (VCXO) ヘフィードバックし、変調周波数を FSR に一致させる。また、位相変調周波数に 180Hz の変調をかけ、透過光 Quadrature-phase 復調信号スペクトルの 180Hz 成分が最小になりように、モードクリーナーを動作点に保つフィードバック制御の DC オフセットを調整する。

## 3.4.5.2 FSR ノイズ DC 成分と FM ノイズ DC 成分の除去

図 3.4.2 は位相変調周波数と FSR の差の、変調周波数制御を ON、OFF したときの様子である。制御をかけないとき位相変調周波数と FSR の差は、ドリフトしているが、制御をかけると、位相変調周波数は FSR に一致する。図 3.4.3 は透過光復調スペクトルの 180Hz 成分を小さくするように、DC オフセットを調節したときの様子を示している。180Hz のピークの減少に伴い、フロアーノイズも減少している。

### 3.4.5.3 結果

 $(\Delta \nu_{\rm FM})_{\rm DC}$ と $(\Delta \nu_{\rm FSR})_{\rm DC}$ を制御したときの透過光復調スペクトルを図 3.4.4、図 3.4.5 に示す。TAMA300 の観測帯域およびそれ以上の周波数帯域でショットノイズレベルまで、位相変調透過に伴う強度ノイズを低減 させることに成功した。



 $\boxtimes$  3.4.2: The FSR deviation when the modulation frequency servo is on and off.



⊠ 3.4.3: Noise spectra of the quadrature-phase demodulated signal when the FM DC deviation is optimized and not optimized.



 $\boxtimes$  3.4.4: Noise spectra of the inphase demodulated signal for the transmitted light.



 $\boxtimes$  3.4.5: Noise spectra of the quadrature-phase demodulated signal for the transmitted light.

## 3.4.6 ドリフトに対する考察

位相変調周波数と FSR の差のドリフトの原因をつきとめるために、周波数カウンターで位相変調周波数を 測定し、位相変調周波数と FSR との差の誤差信号と比較した。変調周波数が制御されていないとき、発振器、 FSR、周波数カウンターはそれぞれ独立である。このとき、図 3.4.6 より、周波数カウンターで測定した変調 周波数 (line-A) のドリフトは変調周波数と FSR との差の誤差信号 (line-B) のドリフトよりも小さい。(line-A) はほぼ一定なので、発振器と周波数カウンターは共に、大きな変化が無いと考えられ、(line-B) のドリフトか ら、FSR の変化が主であると考えられる。モードクリーナーを動作点に保つ制御は低周波 (< 30 Hz)では、 共振器長を制御しているため、FSR の変化はレーザー周波数の変化に起因している。

図 3.4.7 は 図 3.4.6 の横軸を拡大したものである。この短い時間周期では、2 つの振る舞いは良く一致して いる。よって、短い時間スケールでは、双方に寄与している、発振器の周波数が変化していると考えられる。

この測定によって、位相変調周波数とFSR の差の変化の原因は、1時間に数 Hz 程度のドリフトに関して は、レーザー周波数のドリフトに伴うFSR のドリフトに、1分程度で sub-Hz 程度の変化は、変調周波数を 発振している VCXO の変化に起因していることがわかった。



 $\boxtimes$  3.4.6: The modulation frequency (A) and  $\Delta \nu_{\rm FSR}$  (B).



 $\boxtimes$  3.4.7: The modulation frequency (A) and  $\Delta \nu_{\rm FSR}$  (B). Time scale magnification of fig 3.4.6

### 3.4.7 結論

TAMA300 でモードクリーナーを開発し、干渉計動作に必要な位相変調光を透過させることに成功した。この変調透過に伴って、モードクリーナー透過光に現れた強度ノイズを、観測帯域で除去した。

# 3.5 鏡懸架システム

### 3.5.1 はじめに

干渉計型重力波検出器において、鏡懸架システムは鏡を地面振動から防振することおよび重力波検出のテ ストマスとして観測帯域で束縛力を与えないように支持するという2つの役割がある。さらに、干渉計を安 定に動作させるために鏡の位置を高精度・低雑音に制御できなければならない。そこで、われわれは4つの 特性、すなわち、防振特性(並進・回転)、制御性、熱雑音、真空特性を考慮して TAMA 用鏡懸架システム の開発をおこなった。

その結果、図 3.5.1 のような 2 段振り子式の懸架方法を採用した [1, 2]。TAMA では実際にはスタック [3] 、X振り子 [4] の防振系とともにこの懸架システムが用いられ、それぞれ数十 Hz 以上あるいは数 Hz 以下の 防振特性の向上がはかられる。

以下では、TAMAにおける懸架システムの開発について詳述する。3.5.2節では各設計項目について、また 3.5.3節では試作機による性能評価について述べる。3.5.4節ではTAMAで実際に用いられている懸架システムについて特に配慮した点などについて述べる。

## 3.5.2 懸架システムの概要

### 3.5.2.1 防振特性

地面振動は懸架システムにより観測帯域(150Hz~450Hz)で目標感度以下に防振されなければならない。 TAMAの目標感度は  $h_{\rm rms} = 3 \times 10^{-21}$  at ~300Hz であるから各鏡の変位としては  $2.6 \times 10^{-20}$  m/ $\sqrt{\rm Hz}$  に相当 する。典型的な地面振動の変位スペクトル  $10^{-7}/f^2$  m/ $\sqrt{\rm Hz}$  (f[Hz]: 地面振動周波数)を仮定すると -165dB 以上の防振比が必要ということになる。

このような大きい防振比を実現するために防振特性のよい2段振り子の防振系を採用した。最終マスであ る鏡と懸架点の中間に鏡と同程度の質量(中段マス)を持つ2段振り子構造をとることにより、観測帯域で良 好な防振特性を持たせることが出来る。2段振り子に安定な制御が出来るかどうかは自明なことではないが、 国内の各 Fabry-Perot-Michelson 干渉計型プロトタイプ重力波検出器やテーブルトップ実験でも2段振り子 が用いられ、成果をあげて来たと言う実績がある[5,6]。

ダンピング機構を持たない振り子は、低周波の共振において地面振動を増幅するため、干渉計の制御のダ イナミックレンジを超えて大きく揺れてしまう。この振り子運動のダンピングには簡素な点を重視し、永久 磁石による渦電流損失を利用した受動的なものを用いた。また、3.5.2.4節で述べる熱雑音を考慮して上段の おもりにダンピングを加える構成とし[7]、さらにダンピング磁石を通じて地面振動が導入され防振効果が劣 化するのを避けるために、磁石自身をやわらかい支持機構により防振した。なお、このようなダンピング方 式も東大理学部のプロトタイプ干渉計などにおける実績を持ち、コンパクトかつシンプルなシステムで低周 波の大きな揺れの抑制ができる。

図 3.5.2 は、ダンピングのない単振り子と2 段振り子および2 段振り子で固く支持されたダンピング磁石あるいはやわらかく支持された磁石、それぞれの場合の防振特性の計算結果を示している。やわらかく支持されたダンピング磁石の場合は振り子共振が抑えられ、しかも高周波での防振効果が損なわれていない(-168dB at 150Hz)ことがわかる。

#### 3.5.2.2 鏡の回転運動

ワイヤーで懸架された鏡は、並進・回転の合計6自由度について運動することが可能である。鏡の運動は、 懸架点に加わる振動が鏡に伝達することによって引き起こされる。完全に対称で、すべてのワイヤーがマス の重心高さにクランプされた懸架では、懸架点から鏡への伝達関数は完全に直交する。つまり、懸架点にあ る自由度の振動が加わった場合、その振動は鏡の対応する自由度にしか伝達しない。しかし、現実の懸架シ ステムでは、たとえば工作精度や組立誤差によって、系の対称性は崩れている。このような場合は、伝達関 数は直交せず、異なる自由度間でエネルギーの交換が行われることになる。このような現象を自由度間のカッ プリングという。カップリングが存在すると、たとえば懸架点の鉛直振動が鏡の回転を引き起こしたり、回転 振動が鏡の並進振動に伝達する場合が生じる。従って、懸架システムでは、光軸方向の防振のみを考慮すれ ば良いわけではなく、全自由度にわたって適切な防振特性を持った系を開発する必要がある。

鏡の回転が干渉計に与える影響は主に2種類ある。ひとつめは、鏡の回転中心が光軸上から外れることに よって生じる雑音である。光軸周りの回転を除いて、光軸から外れた点を中心に鏡が回転振動すると、光軸 上の鏡面は光軸方向への並進振動成分を持つ。そのため、これが直接干渉計の変位雑音となる。これをミス センタリングの効果という。また、第2の効果として、鏡の回転によって Fabry-Perot 共振器の固有モードが 変化し、入射光とのマッチングが低下するという現象がある。このようなミスマッチングが生じると、干渉計 内の電場分布が変化し、コントラストやリサイクリングゲインの低下を招く。これらは機械的に変位が生じるものではないが、やはり干渉計の感度を低下させる効果がある。また、それだけでなく、制御に必要な信号の取得が困難となり干渉計の動作が不安定となる問題も生じる。たとえばミスセンタリングの量を 0.5mmと仮定すると、鏡の回転の許容値は、観測帯域での RMS 振幅で  $4.5 \times 10^{-16}$  rad、ミスマッチングの影響から求められる許容値は、全帯域での RMS 振幅で  $5 \times 10^{-7}$  rad となる。

そこで、並進防振特性と同様に回転自由度に対しても、試作機を用いた実験と計算機シミュレーションにより特性評価を行い、最終的なパラメータを決定した(3.5.3節)。

#### 3.5.2.3 制御性

干渉計を長期間安定に動作させるためには、鏡の変位と角度はつねに最適な干渉状態になるように制御されなければならない。

まず、鏡の光軸方向の制御(フリンジ制御)のダイナミックレンジについて考える。目標感度に相当する 鏡の変位雑音を達成するためには鏡(質量約1kg)に加える制御力のノイズが $2.6 \times 10^{-20} \times (2\pi f)^2 \text{ N}/\sqrt{\text{Hz}}$ すなわち $2.3 \times 10^{-14} \text{ N}/\sqrt{\text{Hz}}$  at 150Hz 以下でなければならない。一方制御範囲としては、地球潮汐による地 盤の伸び縮み量が300m で ~  $10^{-5}\text{m}$ 、トンネルの伸び縮みは TAMA と類似の計量研の光学トンネルのデー タによると日周変化が $2 \times 10^{-5}$  m、年周変化が $3 \times 10^{-3}$  m と見積もられる [8] 。したがって、制御力として は固有周波数 1Hz の振り子で $7.9 \times 10^{-4}$  N(日周変化)  $1.2 \times 10^{-1}$  N(年周変化)が必要になる。オペアン プなどを利用した通常の回路では雑音レベル  $1\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、最大 10V 程度のダイナミックレンジであるから同 ーのアクチュエーターでは日周変化の制御でさえ難しい。

そこで、この懸架システムではフリンジ制御に2つのアクチュエーターを用いている。ひとつがコイルと 磁石によるもので、干渉計を動作状態に維持するように鏡の位置を制御する。低雑音を実現するために可動 範囲を ≲6µm 程度におさえてある。もうひとつはピコモーター(電動マイクロメーター、New Focus, Inc.) によるもので、日周変化などゆっくりした大きい動きに対してコイル・磁石アクチュエーターの可動範囲を 越えないように、懸架部分全体を移動させることができる。この制御は電動機構であり観測データに振動ノ イズが混入する可能性があるために常時駆動するわけにはいかない。たとえばある決まった時刻毎に断続的 に駆動するという方法がとられるであろう。

つぎに鏡の角度制御について考える。初期インストール時の鏡の角度補正やスタックの角度ドリフトを考えると角度制御範囲として 10<sup>-3</sup>rad は必要である。これをフリンジ制御用のコイルを使って行う場合、1-loop 吊りで pitch 方向の共振が 3Hz とすると  $3.3 \times 10^{-3}$ N の制御力が必要となるので駆動範囲を越えてしまう。そこで鏡を 2-loop 吊りにして一方の吊り金具をピコモーターとピエゾ素子(PZT)で駆動することにより鏡のあおりを調整する方法を用いた。ピコモーターは  $\sim 10^{-4}$ rad 以上の粗調、ピエゾ素子はそれ以下の微調に用いる。あおりの精度はリサイクリングゲインの要請から  $10^{-7}$ rad 程度必要であるが、ピエゾ素子を用いればこれは容易に実現できる。

#### 3.5.2.4 熱雑音

TAMA 重力波検出器の感度を決める熱雑音は振り子モードの熱雑音と鏡の内部モードの熱雑音があるが、 まず振り子モードについて考える。この鏡懸架装置では渦電流損失によるダンピングを使っているので、こ の熱雑音が干渉計の感度に影響しないか確認する必要がある。ダンピング力は振り子の鏡でなく上段のおも りに加えられるので、下段の振り子によって防振される。図 3.5.3 はダンピング磁石による熱雑音から予想さ れる鏡の変位、および下段の振り子の損失(ワイヤー  $Q = 2.5 \times 10^5$ 、振り子  $Q = 5 \times 10^5$ )の熱雑音から 予想される鏡の変位を示している [9] 。観測帯域では下段振り子の損失が鏡の変位雑音を決めている。鏡の yaw と pitch の熱雑音も同様に下段の振り子の損失で決まり、目標感度を達成するには yaw は  $Q > 4 \times 10^3$ 、 pitch は  $Q > 4 \times 10^4$ 、またレーザービームを鏡の中心から水平方向 1mm 以内、垂直方向 0.5mm 以内の精度 に維持することが必要となる。実験的には振り子モードの Q に関してすでに  $10^5$ 台のデータが得られている (5.4.3 節)。

一方、鏡の内部モードの熱雑音は Hutchinson の方法 [10] で計算された各モードの熱雑音の寄与から見積 もったところ、TAMA の目標感度を達成するには各モードの Q が  $2 \times 10^7$  以上なければならないという結果 になった [9] 。これはかなり厳しい条件になるが、懸架方法などについて現在実験をすすめている [11] 。こ れら内部モードの熱雑音に関する実験は 5.4.5,5.4.6 節に述べられている。

### 3.5.2.5 真空特性

懸架装置は超高真空中( $p \sim 10^{-6}$ Pa)で使用されるのでできる限り脱ガスの少ない材料を用いなればならない。とくにステージやピコモーターなど摺動部分のあるものに関しては潤滑剤を使わないような超高真空仕様のものを特注した。そのほか、ピエゾ素子はメタルカン封入のもの、コイルボビンや巻き線はセラミッ

ク系のもの、鏡の緩衝材には最小限の量のテフロン、その他は金属で構成するなどして脱ガスの低減に配慮した。個々の部品レベルでの脱ガスの評価に加えて、組み上げられた懸架装置全体の脱ガスの評価をおこなった(3.5.4.3 節)。

## 3.5.3 試作機による性能評価

前節で述べたように、TAMA300 で必要となる防振性能を得るため我々は弾性支持磁石ダンピングつき 2 段振り子の方式を採用した。この方式には多くの利点が存在するが、良い防振性能を得るためには、その特 性について詳細に検討する必要があった。そこで、我々は予備実験やモデル計算に基づき TAMA300 用懸架 システムの試作機を製作し、その防振特性を実測および計算の両面から検討した。

本節では、弾性支持磁石ダンピングつき2段振り子の方式の利点、懸架システム試作機の設計と防振特性 測定、回転振動特性、そしてより良い懸架システムをめざす際の問題点の順に述べる。

#### 3.5.3.1 試作機の設計

2 段振り子には多くの利点が存在するが、数 Hz から数十 Hz の周波数帯に振り子共振や剛体共振が数多く 存在するため、注意深く設計しなければ干渉計の動作にはかえって不利となる。そこで、予備実験やモデル 計算の結果や、実際に TAMA300 で用いるために必要な制御機構や調整機構なども考慮した試作機を設計お よび製作し、その防振性能を評価した。

設計にあたっては、質点モデルにより求めた各マスの質量比や、マグネットによるダンピングの大きさの 最適値から、大まかな寸法を定め、剛体モデルでモード周波数、モードのQ値、および地面振動から各自由 度への伝達関数を検討してクランプ位置などの詳細な調整を行った。

共振周波数が高い共振に対しては磁石による渦電流ダンピングが有効でなくなるため、共振峰が防振比に 悪影響を与え易くなる。逆に共振周波数が低い場合にはQ値が十分小さくないと低周波の振幅の大きい地面 振動を吸い、鏡が大きく揺れる。このようなことから設計の指針として:

- 1. 共振周波数は 1 ~ 10Hz となるようにする。
- 2. 並進運動と角度揺れのカップリングをなるべく小さくするために、ワイヤーがマスからはなれる高さは 重心とあわせるようにする。
- 3. 振り子モードだけでなく、角度揺れなどのモードについても、鏡の動きと中段マスの動きが良く連動す るようにパラメータを調整し、各モードのQ値が小さくなるようにする。

という事柄に留意した。熱雑音の影響を避けるために、中段マスと鏡の間はワイヤー以外のバネ等を入れて はならない、という制約条件があるため、剛体運動のうち2つのモードの周波数が20Hz 台になったが、そ れ以外の共振については、振り子共振0.8Hz を最低に、ほとんどの共振は10Hz 以下に、多くのモードのQ 値も10以下にすることができた。

鏡の回転に関しても、並進の場合と同様、実験とモデルによるシミュレーションを並行して行った。地面 振動スペクトルの実測値あるいはモデル関数とシミュレーションで求められた伝達関数を用いて鏡の回転ス ペクトルの予測を行った。また、系の非対称性をランダムに導入するモンテカルロ計算を行い、その伝達関 数と地面振動からカップリングによる鏡の回転量の見積もりを行った。また、鏡の回転の熱雑音についても シミュレーションを行った。シミュレーションにおいては、系に極端な非対称性がない場合は要求値を満た すことがあきらかとなった。

# 3.5.3.2 防振性能の測定(並進)

このような設計をもとに図 3.5.1 の形状の試作機を製作した。試作機の防振比 (並進方向の地面振動から鏡の並進方向の自由度への伝達関数)の実測は振動試験台を用いた実験により行った。基本的には、振動台に懸架システムを固定して加振し、台の振動と吊られた鏡の振動を反射型フォトセンサー、ピエゾ加速度計、マイケルソン干渉計を用いて測定し、伝達関数を求めた。

光軸方向の防振比の測定結果を図 3.5.4 に示した。この測定では 10Hz 以上での加振変位をかせぐため、懸架システム上部を加振器に固定した加振棒で直接励起するなど測定方法に工夫を行った。その結果、20Hz で-90dB, 30Hz で-100dB という高精度のデータを得ることができた。測定データの 20Hz までは防振比はベローズの弾性共振を採り入れた力学モデルの計算と一致している。30 ~ 40Hz 以上では加振器の振動に対してコヒーレントに発生する音の影響やセンサーノイズによって、-80dB ~ -100dB で測定が制限されている。結果として、この値が観測帯域での防振比の上限値となっている。しかし、観測帯域の下限(150Hz)でも上限値として約-100dB という TAMA スペックをほぼ満たす値となっている。以上のような結果から、弾性支持磁石によるダンピングを施した 2 段振子懸架システムの有効性が実験的にも検証され、光軸方向の振動に

対する防振に関しては TAMA での必要性能を満たしていることが結論された。

また、光軸と直交する2方向(水平面内および鉛直方向)に懸架システムを振動させたときの光軸方向の振動(カップリング)も10Hz以上では光軸方向の防振比と同程度の値が得られた。このカップリングは懸架システムの懸架状態の不完全性に起因するものであると考えられる。とくに鉛直振動から光軸方向へのいわゆるZXカップリングが防振比を支配する可能性はある。しかし、この結果が再現性があるかどうかは不明であるため、再実験をして比較する予定である。

3.5.3.3 防振性能の測定(回転)

鏡の回転に関しては、懸架システム試作機に加振器によって人工的な外乱を加えて鏡の回転への伝達関数を 測定する加振実験と、TAMA サイトに実際に設置してその回転スペクトルを直接測定する静置実験とを行った[12]。

加振実験は、東大理学部の動電型加振器に振り子試作機を設置して行った。鏡の代わりとなる金属製のダ ミーマス、中段マスなどに小型のピエゾ加速度計を2つ取り付け、その差動信号を用いてマスの回転振動を 検出した。なお、観測帯域での測定は並進防振比の測定と同様、加速度計の感度、音などの環境による雑音 によって制限されており、測定することができなかった。

水平方向への加振実験では、マスの回転は並進振動からのカップリングではなく、加振器の加振方向のぶ れによって決定されることが確認できた。これは、カップリングが十分に小さなことを意味する。また、鉛 直方向の加振実験では、並進外乱からマスの回転へのカップリング伝達関数を測定することができた。測定 されたカップリング伝達関数は、シミュレーションの範囲内に収まるものであった。

静置実験については、振り子試作機を TAMA サイトの複数箇所のスタック上に実際に設置し、環境からの 外乱によって励起される鏡の回転運動を光てこによって測定した。光てこの感度不足から観測帯域での回転 量は直接測定することができなかったが、鉛直軸周りの回転 (Yaw) に関しては、全帯域での RMS 振幅の上 限値が  $4.3 \times 10^{-7}$ rad と、要求値を満たすことが確認された。一方、これに直交する Pitch モードの RMS 振幅は、 $3.4 \times 10^{-6}$ rad と、要求値より 7 倍程度悪い値となることがあきらかとなった (図 3.5.5)。

Pitch 回転の RMS 振幅を決定する共振の周波数は 4Hz~5Hz の間に位置する。地面振動においても、関東 地方特有の地盤構造により、1Hz~10Hz には緩やかなピーク構造がみられる。さらに、この帯域には懸架シス テムを設置するスタックの共振が存在するため、この帯域に鏡の回転共振が存在するのは望ましくない。そこ で、鏡を吊るワイヤーの直径やワイヤー間隔を変更して鏡の回転共振周波数を適当にずらしたところ、Pitch 回転の RMS 振幅を改善できることが立証された。

#### 3.5.3.4 懸架システム開発における諸課題

懸架システムの開発において、現時点では次のような問題点が存在している。これらを克服することがで きれば、さらに懸架システムの理解を深め、性能を向上させる事が出来るであろう。

● モデル計算

現在、モデル計算としては質点モデルにワイヤーの弾性体振動もとり入れたものと剛体運動を記述するモ デルとが確立されている。しかし、実際の懸架システムにはフレームやステージなどの弾性体振動、バネ材な どの高次モードなど、モデルに取り入れるのが困難な部分があり、実験と計算の差を作る原因となっている。

• 実際の懸架システム

上で述べた「モデル化が難しい振動」は、実際の懸架システムから除去するのが難しい部類の共振でもある。また、バネ材は基本モード周波数が数 Hz 付近になるようにバネ定数を設定しているため、観測帯域付近 に高次モードの共振が現れやすい。

カップリングは個々の懸架装置の個体差があると考えられる。懸架状態の不完全性から来るカップリング の測定では、あくまでカップリングの典型値を推定することしかできず、また干渉計に組み入れる懸架装置 を振動試験することもできないので、懸架装置のカップリングの値が必ずしも典型値になっていることを保 証することが出来ない。

防振特性の測定方法

我々が用いている実験方法において防振特性の測定を制限している雑音は、センサーの雑音と加振時の音 による雑音である。懸架装置の性能が良くなると、防振特性を測定するセンサーにも高感度が要求される。ま た、センサーが高感度であっても、振動試験の際には加振に伴い音が発生するため、振動試験台で懸架シス テムを振ることにより与えられた鏡の振動よりも、音による外乱の方が大きい時には、測定限界が音で決っ てしまう。真空中で加振実験を行う方法は、真空容器に共振があるため、容易ではなく、現在までに成功して いない。

### 3.5.3.5 試作機開発のまとめ

ここまで述べたように、TAMA300 用懸架システム試作機の性能評価を行った。スタックやX振り子と組 み合わせて3つの防振系全体の防振比としては TAMA300の要請を満たすことが出来る見通しであるため、 試作機とほぼ同様の実機を製作することとした。

## 3.5.4 TAMA 用懸架システムの製作

実際に用いられている TAMA300 用鏡懸架システムは 3.5.4 節で述べられた試作機の基本設計がベースと なっている。ビームスプリッター用懸架装置、ピックオフ用懸架装置も同様の設計を行い、実機の製作が行 われた。なお、これら実機の製作は(株)ニコン技術工房に協力していただいた。

鏡懸架システムは各腕とリサイクリングミラー用で計5台用いられるが、インストール時および長期観測 における実用性を考慮して、試作機よりもいくつかの機能が追加されている。また、真空特性についても配 慮されている。これら実機について追加された機能や性能評価について本節で述べる。

### 3.5.4.1 鏡の保護

実際の鏡の取り付けやその後の調整が容易になるようにいくつかの点を工夫した。まず、2段振り子の下 段の調整がしやすいように吊り金具を外せるようにして下段だけ独立してワイヤー長の調整ができるように した。また鏡を保護するためにテフロンの緩衝材付きの鏡受けとクランプを採用した。このクランプは懸架 システム運送時の鏡固定のほかに、鏡の位置の初期調整や観測中の鏡の落下時の受け皿の役割も果たす。

実際の干渉計の運転では何度か地震に見舞われたが、鏡の落下は免れることができた。しかし、鏡に接着 してあるアクチュエーター用磁石が剥離するという事故が起こった。原因の分析により、地震時の鏡の横方 向のゆれに対するガードが不足していたことが判明した。そこで、現在ではその部分のガイドをすべての鏡 懸架装置に付加し、その後そのような事故は起こっていない。

#### 3.5.4.2 インストール手順

試作機の組立は鏡懸架システム開発グループのメンバーにより行われたが、これには若干の熟練を要する。 TAMA 干渉計で使用される鏡懸架システムは計5台であるがこれらすべてを鏡懸架グループのメンバーが 組み立てることは難しい(多くのメンバーは他の仕事もかけもちをしている)。メーカーで組立出来る部分は あらかじめそのようにしてもらったが、鏡を吊す部分のインストールは微妙な調整が必要であり現場で行う ことになる。そこで、現場の複数の人間が振り子を組み立てられるようにインストール手順の文書化を行っ た。また、真空容器内での作業量を減らすような手順がとられた。

これらにより、若干の練習は必要とするが、現場の比較的広範囲の人間が直接振り子の調整を行うことが できるようになった。これは干渉計動作中の問題発生時の現場での迅速な対応につながり、また開発サイド と現場サイドで振り子の問題点や改良案などの意見交換にもつながった。

#### 3.5.4.3 真空特性の評価

試作機はある程度の真空に対する配慮の下に設計を行ったが、防振特性の評価などが目的であったために 実際には超高真空部品がつかわれていない箇所があった。TAMA で使用される鏡懸架システムではすべての 部品に真空対応のものを使用し、洗浄はもちろん、ネジ穴なども空気抜き穴を配置し、真空特性に配慮した。 懸架システム全体の真空特性についてはメーカーで製作された実機を用いて脱ガス特性の評価が行われた。手 順は以下のようにテスト真空槽および TAMA 真空槽にインストールした状態でそれぞれでおこなわれた。

テスト真空槽での測定は、実機一台がそのまま入るような真空容器(50cm 径×高さ1m)を用意して真空 にした後、ビルドアップ法により脱ガス率を求めた。各構成部品と振り子全体それぞれの脱ガスの測定から 得られた結果によると、ピコモーター・テフロン・ステージで振り子全体の脱ガスの約8割を占めると見積 もられた。

TAMA 真空槽にインストールした状態の測定は、西エンド真空槽中でスタック上に2台の実機を配置した状態で行われた。得られた結果は振り子1台あたり約 $3 \times 10^{-6}$ Torr· $\ell/s$ の脱ガスであり、真空容器全体の脱ガスとして3割程度の寄与になると見積もられる。

### 3.5.4.4 300m 干渉計における動作性能

TAMA では 300m 2 本腕の動作が最終目標であるが、干渉計の基本動作を確認する意味で、まず片腕(東西) 300m の Fabry-Perot のテストがおこなわれた。このテストで振り子の基本動作特性や長期安定性についての評価がおこなわれた。ピコモーターによるアラインメントやコイルアクチュエーターによるフィードバックも問題なく動作した。

比較的大きい問題としては鏡の pitch 方向のゆれが大きく、振り子の pitch 共振周波数とスタックの光軸方 向の共振周波数が近くなっていることが主な原因であると推測された。試作機による実験では、鏡を吊るワ イヤーの直径やワイヤー間隔などの geometry を変更して鏡の回転共振周波数を適当にずらすことが有効であ ることが示されたが、実際のシステムでは弦振動周波数や熱雑音など他の要求もあり、ずらせる自由度は大 きくない。試作機の実験でも geometry の変更のみで TAMA の要求が完全に満たせるほどの効果ではなかっ た。結局、この pitch 回転の問題に対しては、アラインメント制御の帯域を 10Hz 以上まで広げて鏡の回転を 外部制御することで、TAMA で必要とされる精度の範囲内に収めることができた [13]。

300m 干渉計のテストでは数日にわたる共振器長の変動をモニターする実験が行われたが、10日間で数えるほどのロック落ちしかなく良好の結果となった [14]。この実験により、アラインメント制御の威力とともに振り子自身の安定性についても示されたことになる。

## 3.5.5 まとめ

観測状態での鏡懸架システムの防振効果や熱雑音については、TAMAの最終的な感度曲線が測定されるまで待たなければならないが、これまでの実験データからは深刻な問題は認められていない。最終的な TAMA の感度曲線から振り子に起因する部分を調べ、次期の鏡懸架システムに反映させていく考えである。

# 参考文献

- A. Araya, K. Arai, Y. Naito, A. Takamori, N. Ohishi, K. Yamamoto, M. Ando, K. Tochikubo, K. Kawabe, and K. Tsubono, Gravitational Wave Detection: proceedings of the TAMA international workshop on gravitational wave detection, p. 55 (Universal Academy Press, Tokyo, 1997).
- [2] K. Arai, A. Takamori, Y. Naito, K. Kawabe, K. Tsubono, and A. Araya, Gravitational Wave Detection: proceedings of the TAMA international workshop on gravitational wave detection, p. 361 (Universal Academy Press, Tokyo, 1997).
- [3] R. Takahashi, F. Kuwahara, and K. Kuroda, Gravitational Wave Detection: proceedings of the TAMA international workshop on gravitational wave detection, p. 95 (Universal Academy Press, Tokyo, 1997).
- [4] M. A. Barton, N. Kanda, and K. Kuroda, Rev. Sci. Instrum. 67, 3994 (1996).
- [5] K. Kawabe, S. Nagataki, M. Ando, K. Tochikubo, N. Mio, and K. Tsubono, Appl. Phys. B 62, 135 (1996).
- [6] A. Araya, N. Mio, K. Tsubono, K. Suehiro, S. Telada, M. Ohashi, and M.-K. Fujimoto, Appl. Opt. 36, 1446 (1997).
- [7] K. Tsubono, A. Araya, K. Kawabe, S. Moriwaki, and N. Mio, Rev. Sci. Instrum. 64, 2237 (1993).
- [8] 大石忠尚、桜井好正、瀬田勝男、藤間一郎、本多徳行、清野昭一, 測地学会誌 42, 155 (1996).
- [9] K. Yamamoto, K. Kawabe, and K. Tsubono, Gravitational Wave Detection: proceedings of the TAMA international workshop on gravitational wave detection, p. 373 (Universal Academy Press, Tokyo, 1997).
- [10] J. R. Hutchinson, J. Appl. Mech. 47, 901 (1980).
- [11] N. Ohishi, K. Kawabe, and K. Tsubono, Gravitational Wave Detection: proceedings of the TAMA international workshop on gravitational wave detection, p. 369 (Universal Academy Press, Tokyo, 1997).
- [12] 高森昭光,修士論文「振り子を用いた広帯域傾斜計の開発と TAMA300 用懸架システムの研究」(東京大学, 1998).
- [13] K. Tochikubo, A. Sasaki, K. Kawabe, and K. Tsubono, Gravitational Wave Detection: proceedings of the TAMA international workshop on gravitational wave detection, p. 365 (Universal Academy Press, Tokyo, 1997).
- [14] A. Araya, S. Telada, K. Tochikubo, S. Taniguchi, R. Takahashi, K. Kawabe, D. Tatsumi, T. Yamazaki, S. Kawamura, S. Miyoki, S. Moriwaki, M. Musha, S. Nagano, M.-K. Fujimoto, K. Horikoshi, N. Mio, Y. Naito, A. Takamori, and K. Yamamoto, Appl. Opt. 38, 2848 (1999).



図 3.5.1: TAMA 干渉計で用いられている鏡懸架装置



図 3.5.2: ダンピングのない単振り子、ダンピングのない2段振り子、固く支持されたダンピング磁石の2段振り子、およびやわらかく支持されたダンピング磁石の2段振り子の防振比



図 3.5.3: ダンピング磁石による熱雑音 ("magnet") と下段振り子の損失による熱雑音 ("wire")。 "Phase II" は TAMA の最終目標感度 (リサイクリング時)を与える、観測帯域での鏡の変位雑音レベルである



図 3.5.4: 光軸方向の地面振動に対する防振比と測定の雑音レベル。光軸方向防振比(測定)、光軸方向防振比 (計算)、音によるマスの励起(雑音)、センサーの雑音をそれぞれ示す



図 3.5.5: TAMA300 サイトのスタックに設置された懸架システムの鏡の回転。RMS 振幅は 1kHz から対応す る周波数までの積分値。目標 (Qualification) は、RMS 振幅に対するもの

# 3.6 防振

TAMA の目標感度は  $h_{\rm rms} = 3 \times 10^{-21}$  @300 Hz(BW300 Hz) であり、これは変位雑音  $\delta \tilde{x} = 5 \times 10^{-20} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ に相当する。したがって TAMA のサイトである三鷹 ( $\delta \tilde{x} = 10^{-12} \sim 10^{-11} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ ) では  $10^8$  以上の防振比が 必要である。TAMA ではこれを以下の 3 つの装置を組み合わせることによって実現する。

1. 主に 10 Hz 以上の領域で光学定盤 (ブレッドボード) の防振を行うスタック。

- 2. 主に 10 Hz 以下の領域の防振を行う X-pendulum。
- 3. ミラーを吊るす懸架装置となる2段振り子。

ただし X-pendulum については平成 10 年 2 月の Final Design Review において完成度が十分でないとの判断 により現時点では導入されていない。

### 3.6.1 構成

現在の防振系の構成は図 3.6.1 に示すように 3 本脚スタックで支えられるブレッドボード上に 2 段振り子型 ミラー懸架装置が設置されたものとなっている。

### 3.6.1.1 スタック

ブレッドボードはアルミ製で 2 種類の真空槽に応じて 800 mm  $\phi$  と 1,000 mm  $\phi$  で厚さ 100 mm のものを用いている。上面には光学素子を固定するための多くのタップ孔 (M6、ピッチ 25 mm) が開けられているが、通常の加工法では加工時の潤滑油による汚染が脱脂洗浄後も孔に残り、ガス放出速度は大きくなる。これを防ぐ方法としてエチルアルコールを吹き付けながら切削する EL 加工といわれる方法がとられた。おもりとしては 64-67 kg の SUS ブロックを用いるが、その表面には真空槽内面と同じ ECB(Electro-Chemical Buffing) 処理が施されている。このスタックの最大の特徴はベローズの適用である。一般にラバーとしてはガス放出速度が比較的小さく、ベーキング可能なフッ素ゴム (バイトンなど) が用いられるが、TAMA300 で必要とされる超高真空環境に適合するものではない。またフッ素ゴムによるミラーの contamination も報告されている [1]。そこで我々はラバーを溶接ベローズで覆う方法を採用した。このベローズは 32 フィンからなり、伸縮、横ずれいずれのモードに対しても内部のラバーより十分柔らかい仕様になっている。表 3.6.4 にスタック 用パーツの仕様をまとめておく。ラバーの素材には制約がなくなるので弾性的性質の優れたクロロプレンを用いている。またラバーのずれ弾性率 G は格段で異なっており、これによりスタックを組み立てたときのラ バーのつぶれが一様 (2 mm) になるようになっている。

	ブロック	表面	サイズ	質量	ラバー	サイズ	G
	材質	処理	(mm)	(kg)	材質	(mm)	$(M \cdot Pa)$
1段目	SUS	ECB	$300\phi\times120$	64	クロロプレン	$28\phi\times20$	4.2
2段目	SUS	ECB	$300\phi\times120$	64	クロロプレン	$28\phi\times20$	3.0
3段目	SUS	ECB	$300\phi \times 120$	67	クロロプレン	$28\phi \times 20$	1.9
(ブレッドボード)	Al	$\mathbf{EL}$	$800\phi\times100$	134			
		( <b>一部</b> ECB)	$1000\phi \times 100$	209			

表 3.6.4: スタック用パーツの仕様。

### 3.6.1.2 X-pendulum

振動子系の固有振動数を低くすることによってそれより高いある周波数での減衰比を大きくすることが可 能である。一般に 0.1 Hz の固有振動数をもつ振り子は 25 m の長さを持つが、振り子をたすき掛けにするこ とによって 1 m 以下の短い振り子でもこれが実現できることが見い出された。X-pendulum と名付けられた この機構の周期は幾何学的条件のみにより決定され、周囲温度の変化にも強い [2]。実際の装置では 2 組の X-pendulum が被防振台を吊るしている。また水平 2 自由度の防振装置とするために向きが 90 度異なる 2 つ の X-pendulum を 2 段重ねている (図 3.6.2)。現実の周期はワイヤが被防振台の重さで伸びるため組立・調整 には工夫を要する。この装置の防振特性は重心の保持部分の慣性モーメントのために高い周波数における減 衰率がリミットされることである。これはいわゆる長周期地震計などに採用されているいくつかの機構で生 じるのと同じ問題を提供する。しかし X-pendulum がこれらの機構と異なるのは実現可能な条件でその影響 を打ち消すようにできるという点である [3]。図 3.6.3 に最新型の X-pendulum の伝達関数を測定した結果を 示す [4]。いくつかの共振を持つものの概ね理論上の特性を実現している。

#### 3.6.1.3 懸架装置

2 段振り子にすることにより高い防振比を得ることができる。振り子運動のダンピングには簡素な点を重視 し永久磁石による渦電流損失を利用した passive なものを用いるとともに、熱雑音を考慮して上段のおもりに ダンピングを加える構成とした。さらにダンピング磁石を通じて地面振動が導入され防振効果が劣化するの を避けるために磁石自身をやわらかい支持機構により防振した。なお懸架装置に関しては 3.5 節「鏡懸架シス テム」の項で詳しく説明されている。

### 3.6.2 防振特性

開発は各装置のプロトタイプを作って進められ、個々の装置ごとに加振機を用いて防振特性(伝達関数)が 測定された。ミラーにとって基本的に必要なのは水平方向(X)の防振であるが、クロス・カップリングが存在 するため垂直 (Z) 方向の特性も無視できない。系全体の防振性能を直接測定することは困難であるが、個々に 測定されたデータをもとにスタック及び懸架装置を組み合わせた場合の防振特性が計算できる。図 3.6.4 に最 終的にミラーの X 方向にカップルするすべての経路 (回転を除く)の伝達関数を示す。これより防振に最も影 響を与えるのはスタック Z-Z→2 段振り子 Z-X という経路であることが予測される。観測帯域である 300 Hz 付近では 10<sup>8</sup> が得られている。ところで計算の元となるスタックの伝達関数の 300Hz 以上、2 段振り子の伝 達関数の20Hz 以上は加振機からセンサーへの直接カップリング等により測定が十分な感度で行われていない ため防振比が小さく見積もられている。従ってこの領域では実際には更に防振比がとれていると考えるのが 妥当である。またスタックに対しては実際にインストールされた実機のブレッドボード上の振動が測定された。ただしスタック上では 300 Hz で  $\delta \tilde{x} = 10^{-15} \, \mathrm{m}/\sqrt{\mathrm{Hz}}$  以下の振幅を期待しているので、市販のセンサーで は感度が十分でない。そこで我々は Michelson 干渉計型の地震計に観測帯域で共振を持つ enhancer を取り付 け特定周波数で防振効果を測定した。比較のため真空槽が設置されている床上やスタックのベースとなって いるベースプレート上の振動も測定される。その結果を図 3.6.5 に示す。防振効果は 30 Hz 以上で認められ、 100 Hz で約 40 dB の防振比が得られている。enhancer を用いない場合 100 Hz 以上の領域では干渉計の感度 が十分でないが、enhancerを用いた場合その共振点(190 Hz)でベースプレート上の振動から予測されるレベ ル(点線)と一致している。以上の測定で得られたブレッドボード上の振動レベルや2段振り子の伝達関数か ら予測されるミラーの振動スペクトルを計算したのが図3.6.6である。ただし既に述べたように観測帯域では 各伝達関数がきちんと測定されておらず、上限を与えているに過ぎない。従ってこれは最低保証ラインであ る。実際は100Hz以上で、十分目標変位を達成しているものと考えられる。

ー方回転 (Yaw、Pitch) 方向の揺らぎも干渉計の感度悪化の原因となる。TAMA では RMS で  $5 \times 10^{-7}$  rad 以下であることが要求されている。表 3.6.5 は各装置の基本モードの周波数である。これまで述べたカップリング以外にも X→Pitch などのカップリングが存在するので周波数が近い場合大きな影響を及ぼす可能性がある。事実 wave front sensing 法で測定された東西アームのニアミラーの回転スペクトル (図 3.6.7) はスタックの X と 2 段振り子の Pitch がぶつかる 5 Hz に大きなピークを示している。このピークは RMS で  $10^{-6}$  rad を超えている。

	X[Hz]	Z[Hz]	Yaw[Hz]	$\operatorname{Pitch}[\operatorname{Hz}]$
スタック	3-5	20-22	6-8	15-25
X-pendulum	0.2	5	1.3	2
2段振り子	0.8	4	1	5

表 3.6.5: 各防振装置の基本モードの周波数。

## 3.6.3 安定性

防振装置には長期的安定性も要求される。図3.6.8 は片腕の長時間運転において観測されたエンドミラーの (傾き (Pitch) 変化である。明らかに室温との相関があり温度変化に換算すると約  $10 \, \mu \mathrm{rad}/\mathrm{K}$  である。水平方 向のドリフトに関しては 5.1 節「300mFP 共振器をもちいた絶対長測定実験」の項を参照されたい。このよう な温度変化は LIGO グループからも報告されているが [5]、計算によると当初指摘されていたベローズの空気 ばね (+14  $\mu$ m/K) による影響はラバー (-5  $\mu$ m/K) や土台部分などを構成する金属部 (+15  $\mu$ m/K) の変化量と 同程度である。スタックの傾き変化はこれらの素材の伸縮による高さ変化の数10%のアンバランスによって 引き起こされると考えられる。またこれとは別に 300 mのミラー間で約 20 µmの変位が観測されている。こ れは地下水の断続的な汲み上げによって引き起こされる地殻変動によるもので周波数的には大体 0.2 mHz の 成分を持っている。現在我々はこれらの影響を補正するために温調を用いたミラー位置制御を開発している。 ミラーの懸架装置はスタック防振系上に設置されておりこれらすべてが真空槽の中に入っている。ただし真 空槽とスタックを支えている台座は Double Balanced Bellows[2] という構造によって機械的には切り離され ており、台座だけを動かすことによってスタック、しいてはミラーの位置を制御できる。台座は $40\phi imes 20h$ の 3つの脚で床から支えられており、この脚の部分にヒーターを巻いて脚の長さを伸縮するとスタックが傾くこ とによってミラーの水平位置も変化する。300 W のヒーターを用いた場合のスタックの傾きとそれから換算 されたミラーの変位を測定した所、量的には十分なダイナミックレンジを持っていた。またこの系の伝達関数 を測定したところコーナー周波数が0.05 mHzの2次遅れ系であったが、地殻変動による変位成分の0.2 mHz においても十分なゲインを持つことが分かった。すなわち干渉計から得られた光路長の差動成分をヒーター にフィードバックすることによって数十 µm の地殻変動や室温の変化に起因するスタックのドリフトを打ち 消すことが可能である。すでに片腕で測定されている変位に追随してスタックを動かすデモンストレーショ ンに成功している。

# 参考文献

- [1] A. Abramovici, T. Lyons and F. Raab LIGO Preprint 94-1 (1994) 1.
- [2] M. Barton and K. Kuroda Rev. Sci. Instrum. 65 (1994) 3775.
- [3] M. Barton, N. Kanda and K. Kuroda Rev. Sci. Instrum. 67 (1996) 3994.
- [4] D. Tatsumi, M. Barton, T. Uchiyama and K. Kuroda Rev. Sci. Instrum. 70 (1999) 1561.
- [5] J. Giaime, P. Saha, D. Shoemaker and L. Sievers *Rev. Sci. Instrum.* **67(1)** (1996) 208.
- [6] Y. Ogawa, S. Michizono and Y. Saito Vacuum 44 (1993) 465.



図 3.6.1: 現在の TAMA 防振系の構造。スタックと2段振り子により構成されている。



図 3.6.2: 2次元 X-pendulum の概念図。4 つのユニットで被防振台を吊り下げている。



図 3.6.3: 測定された最新版の X-pendulum の伝達関数。測定点 (●) はいくつかの共振を持つものの概ね理論 曲線と一致している。



図 3.6.4: 最終的にミラーの水平方向にカップルするさまざまな経路の伝達関数。



図 3.6.5: 干渉計型地震計を用いて測定されたスタック上の振動スペクトル。



図 3.6.6: 予測されるミラーの振動スペクトル (上限値)。



図 3.6.7: Wave front sensing 法で測定された東西アームのニアミラーの回転 (Pitch) スペクトル。



図 3.6.8: Wave front sensing 法で測定された東西アームのエンドミラーの傾きと室温の変化。

# 3.7 干涉計制御

## 3.7.1 光路長制御

干渉計型重力波検出器の鏡は,高周波(数 Hz 以上)での防振のため,振子状に懸架されている.しかし逆 に低周波では,鏡は地面振動により常にレーザーの波長よりも大きな振幅で振動している.干渉計を動作点 に置くためには,鏡の位置を常にモニターして,その変動を打ち消すような制御を行わなければならない. TAMA300 第一期観測のための光路長制御系として,pre-modulationを用いた信号取得系と,それに応じ た光学素子制御系を設計し,それに必要となる Radio-Frequency (RF)復調回路,制御用アクチュエータ,低 周波信号の 300m 光伝送システム,を製作した.図 3.7.1 に,制御系の設計がはじまった当初の制御トポロ ジー原案を示す(詳細については[1]を参照).制御に必要な信号は全て pre-modulation で取得される.光路



図 3.7.1: TAMA300 第一期観測用の制御概念原案.実験の進展に伴い,改良と変更が加えられ続けている.

長制御およびアラインメント制御補助用の信号を取得するため,各腕には透過率の高い部分反射鏡が置かれている.この図に示されたトポロジーと制御点は,進行中の TAMA300 の実験が進展して干渉計に関する知見が得られて行くのにあわせて,現在も改良と変更が加えられている.

### 3.7.1.1 信号取得系と復調系

TAMA300 第一期観測では,信号の取得は通常の pre-modulation で行われる.干渉計に入射する光には位 相変調がかけられ,干渉計の反射光と透過光を変調周波数で復調することで,干渉計各部の運動に相当する 信号を得る[1].

一般に,RF 変調法を用いた Michelson 干渉計の信号取得では,復調位相に応じて同相信号(2つの光路に 共通な位相の変動)と差動信号(2つの光路で逆向きの位相変動)を分離する.逆に言えば,復調位相が理想 的な位相からずれると,本来抽出されないはずの自由度が,抽出信号に混入してしまう.このため,復調回 路の復調位相に対する要求は非常に厳しいものになる[2].第一期観測で Michelson-path difference に対する 同相信号の混入比が1対1程度<sup>3</sup>を実現するためには,復調位相のドリフトなどはおよそ 0.1 度以下に抑え なければならない.そこで,市販のシンセサイザや移相器,各種のPLL 回路などの位相の DC 安定性を調 べ,あわせて位相雑音の評価も行った[4,5].この結果,特に市販のシンセサイザでは,DC 的な位相安定度

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>この場合,第二期観測で安東の方法など[3]により同相信号どうしの混入を抑えると,それに伴い,同相信号の差動信号への混入比は 1/100 程度になる.

において TAMA の要求を満たさないことが判明した.一方, DBM を用いて製作した位相同期局部発振器は, TAMA の要求を満たすことが分かった [5] ので, このような位相同期局部発振器を多数用意するような復調 系を設計し,製作した.図 3.7.2 に復調装置のブロック図を示す.この復調系は, TAMA の recombination



図 3.7.2: 位相同期局部発振器を用いた復調装置.上記の機能に,さらに PLL 位相オフセット調整機能を付加し,NIM モジュールの形式で回路を製作した.

実験から導入された.

#### 3.7.1.2 制御アクチュエータの開発

干渉計の鏡の制御機構のうち,特に鏡を動かすアクチュエータと呼ばれる機構の駆動回路の雑音は,注意 深く設計を行わないと干渉計の大きな雑音源になり得る.アクチュエータの最大駆動力と雑音特性には相関 があり,一般に,最大駆動力が「制御により補償される最大変位」にちょうど対応する場合に,雑音を最小 化することができる.そこで,TAMA の鏡の短時間変動(数分程度まで)に対する見積もりを元に,磁石の 選定[7],コイルの形状と巻数の最適化[8]を行い,ドライバ回路の設計と製作を行った.

初期の recombine 実験では、10W レーザーとは別の 500mW NPRO を光源として、干渉計の動作を試みた.このとき、アーム共振周波数と光源の周波数の相対変位の低周波成分が予想したレベルよりも大きく、アクチュエータ系の最大レンジが相対的に不足して、干渉計の動作点引き込みが再現性良く行えないという現象が見られた.モードクリーナーを通した光を用いるという本来のスキームにすればこの問題は緩和されるが、当時、別の要請から、鏡の磁石を再接着する必要が生じたので、磁石を大きなものに交換した.最終的に使用する磁石は Nd 系の  $\phi$  1mm,長さ 5mm のものである [7] が、同材質で  $\phi$  2mm のものに交換し、アクチュエータの最大レンジを上昇させた.第一期運転は、このような経緯で、コイルと磁石のカップリングが大きい状態で行う予定となっている.

第二期の運転では,コイルと磁石のカップリングを再び弱めて,必要な雑音特性を確保する必要がある.このとき,最大レンジ不足を補うために,大きな可動領域と狭い制御周波数帯域を持つような補助制御要素を 用意する予定である.この候補として,スタックの温度制御と,PZTによる懸架点の位置制御が考えられている.

# 3.7.2 アラインメント制御

TAMA300 主干渉計の鏡は入射光に対して常に垂直でなければならず,許容されるずれの最大値はおよそ  $5 \times 10^{-7}$  rad である [9].このために,鏡の角度制御が必要になる.TAMA300 では,この制御のために必要 な信号の検出法として,Wave-Front-Sensing [10] と呼ばれる方法を採用する.

### 3.7.2.1 Wave-Front-Sensor の設計と製作

Wave-Front-Sensing を行うための Wave-Front-Sensor とその復調系を設計・製作した.図 3.7.3 にブロック図を示す.このような装置の雑音レベルを測定したところ [11],暗電流換算で 5.6mA のレベルであり,実



図 3.7.3: Wave-Front-Sensor と復調系のブロック図.

際の干渉計運転時の散射雑音レベルよりやや大きい値で,実用上ぎりぎりの許容範囲内であることが分かった.この装置は,TAMA 片腕実験のときに導入され,recombine 実験,モードクリーナのアラインメント実験でも基本的に同じものが使用されている.

# 参考文献

- K. Kawabe and the TAMA collaboration, in: Proc. TAMA International Workshop on Gravitational Wave Detection, Saitama, Japan, 1996 (Universal Academy Press, 1997) pp. 249–257.
- [2] 河辺径太、「干渉計の復調位相に対する要求」 (TAMA 内部レポート, ftp://t-munu.phys.s.u-tokyo.ac.jp/pub/kawabe/Synth/L0/L0.ps) 1997.
- [3] M. Ando, K. Kawabe, and K. Tsubono, Phys. Lett. A 237 (1997) 13.
- [4] 上田晃三、「Phase Shifter の温度依存性の評価」(TAMA 内部レポート, ftp://t-munu.phys.s.u-tokyo.ac.jp/pub/kozo/phsshfter/phsh.ps)1997.
- [5] 上田晃三、「PLL による復調信号源の開発」(TAMA 内部レポート, ftp://t-munu.phys.s.u-tokyo.ac.jp/pub/kozo/pll/pll.ps) 1997.
- [6] K. Kawabe and K. Tochikubo, "Transducers and Actuators for the Coarse-Control of the Interferometer" (TAMA 内部レポート,

ftp://t-munu.phys.s.u-tokyo.ac.jp/pub/kawabe/driver/coarse\_actuator.ps ) 1996.

- [7] 新井宏二,「TAMA300 用マグネットのばらつき測定」(TAMA 内部レポート, ftp://t-munu.phys.s.u-tokyo.ac.jp/pub/arai/magnet\_coil/magnet\_property.ps)1998.
- [8] 新井宏二、「TAMA300 用マグネット・コイル・アクチュエータのカップリング測定 I, II」(TAMA 内部レポート、 ftp://t-munu.phys.s.u-tokyo.ac.jp/pub/arai/magnet\_coil/magnet\_coil.ps, ftp://t-munu.phys.s.u-tokyo.ac.jp/pub/arai/magnet\_coil/magnet\_coil2.ps ) 1998.
- [9] K. Tochikubo, A. Sasaki, K. Kawabe and K. Tsubono, in: Proc. TAMA International Workshop on Gravitational Wave Detection, Saitama, Japan, 1996 (Universal Academy Press, 1997) pp. 365–367.
- [10] E. Morrison, B. J. Meers, D. I. Robertson and H. Ward, "Automatic alignment of optical interferometers," Appl. Opt. 33 (1994) 5041.
- [11] 河辺径太, 杤久保邦治, 佐々木愛一郎, 上田晃三, 「四分割 RF フォトディテクタの評価報告書」 (TAMA 内部レポート,

ftp://t-munu.phys.s.u-tokyo.ac.jp/pub/kawabe/nittsuki/report.ps ) 1998.

# 3.8 データ取得システム

干渉計型重力波検出器において、取得されるべき信号は大きく分けると、

- 1. 主干渉信号 ( *δL*<sub>-</sub> ) および各種干渉計制御信号
- 周波数領域:重力波観測帯域(50-5 k Hz) 2.実験機器/環境のモニター信号 周波数領域:数10秒-1分に1回程度

である。これらは周波数帯域のみならず、要求される精度、測定機器の分散度などデータ取得における緒条 件が大きく異なるため、我々はデータ取得システムを「高速データ取得システム」と「低速データ取得シス テム」に分離、構築することにした。ここでは、これらシステムの詳細について説明する。

# 3.8.1 高速データ取得システム

「高速データ取得システム」とは、干渉計型重力波検出器 (TAMA) から取り出した「重力波信号」を含む 主干渉信号を記録する装置全体を指す。

TAMA では、長期間にわたる連続運転により 1 Mpc 以内(主に我々の銀河内系とその近傍、アンドロメ ダ銀河までの範囲)で重力波イベントが起こった場合、これを観測することを目的としている。この目的の ため、「高速データ収集システム」は以下の特長を有しなくてはならない。

- 1. 観測帯域の上限を数 kHz にするため、主干渉信号を 20 K samples/sec という速いサンプリングレート でデジタル信号に変換できること。
- 重力波イベントが何時発生するか分からないので、24時間切れ目なく波形を記録できること。また長期間観測の為に、三日間程度人の手を煩わせずにデータ収集が継続できること。
- 3. 重力波検出器同士またはその他の光学観測装置との相関を取るために、イベントが観測された時刻を1 0マイクロ秒以下の精度で確定できること。
- 4. 他の重力波検出器との相関解析が容易なように、「重力波共通フォーマット (IGWD)」でデータを記録すること。
- 5. 温度、湿度、真空度など実験環境データを「低速データ取得システム」から受取り、同時に記録出来る こと。



図 3.8.1: 高速データ取得システムの構成

図 3.8.1 に「高速データ取得システム」の構成を示した。このシステムの仕様は先に述べた要請を満たすため、以下の様なものである。

- A/D 変換部 + アンチ・エイリアシング・フィルター (LPF)
   高速サンプリングが可能な A/D 変換器
   エイリアス効果を除去するための急峻な高周波除去特性 (135 dB/oct)
- GPS 部 長期安定度の高い周波数基準 (10<sup>-12</sup>/day)

高精度時刻基準機能 (デコード方式として IRIG-B120 規格を採用)

- 高速 / 大容量データ転送部 MXI bus (Multisystem eXtension Interface Bus) を採用することで高速に大量のデータをホストコン ピューターに転送。
- ワークステーション 大量に送られてくるデータをオンライン処理し「重力波共通データフォーマット (IGWD)」として記録。その際、実験環境モニター等も同時に記録する。
- 大容量データ記録部
   容量20GBのテープ (DLT) に「重力波共通データフォーマット (IGWD)」で書かれたファイルを転送、保存する。テープは auto-loader により最大5本まで自動交換可能。これにより、全自動で3日間データ収録が可能。

3.8.1.1 A/D 変換部 + アンチ・エイリアシング・フィルター (LPF)

アナログ信号をデジタル信号に変換する部分については下記の仕様である。

- 8 チャンネル / 20 kHz sampling
- 全チャンネル同時サンプリング
- 実効雑音レベル 80 d B 以下

しかしこのままでは、デジタル信号を解析する際に「エイリアス」という問題が発生する。

そこで、実際には10kHz以上の高周波成分をノイズレベル以下に抑圧するため急峻な特性を持ったロー パス・フィルター (LPF) が必要である。具体的には、図 3.8.2の示すようなフィルターを用いることにより



図 3.8.2: アンチ・エイリアシング・フィルターの特性:カットオフ周波数 5 kHz に設定した時の実測値、エ イリアシングの起こる 10 kHz 以上の帯域で -80 dB を達成していることが分かる。

実効周波数上限を 5 kHz にする。これは、有力な重力波源である連性中性子星合体の「inspiral phase」を観 測するには十分な帯域である。
#### 3.8.1.2 GPS 部

GPS (Global Positioning System) とは、米国で軍事/民生用に開発された衛星を使った「全地球的位置決 定システム」であるが、このシステムは副産物として非常に正確な周波数/時刻基準を安価に与えてくれる。 特に我々には「長期的な周波数安定度」と「時刻の確定精度」が以下の理由で必要である。

長期的に安定な周波数基準は、パルサーの様な周期的な重力波源の解析のために必要である。水晶発振器 は短時間では安定ですが、1日以上の時間スケールでは温度などの影響で $10^{-5} \sim 10^{-8}$  程度しか精度がない。 例えば、我々のデータは 20 kHz でディジタル信号に変換しているので1日あたりのデータ数は N = 20 k samples/sec ×10<sup>5</sup> sec = 2 × 10<sup>9</sup> samples となる。通常 10<sup>-8</sup> 以上の長期安定度を得るためには温度調節機能 などの大掛かりな装置が必要ですが、GPS ではアンテナを設置するだけで 10<sup>-12</sup> 以上の高精度な周波数基準 を安易に得ることが出来る。この精度は1年の観測でデータ数1つ分の誤差もないほどの時間精度である。

GPS 受信器の中には周波数基準としてだけでなく、時刻の確定機能も持ったものがある。今回我々が導入 した GPS 受信器は 110 ns 以下の精度で UTC 時に lock されている。実際には IRIG-B という規格の電気信 号を、主干渉信号と同様に 20 kHz でデジタル信号に変換して記録することで解析時に精度良く時刻を確定 する。



図 3.8.3: IRIG signal: 1 kHz の搬送波に強度変調を掛けることで時刻情報を送っている。

#### 3.8.1.3 高速 / 大容量データ転送部 + ワークステーション

A/D 変換器から出力される 320 kB/sec もの大量のデータを記録装置を搭載したコンピューターまで転送 する必要がある。実際には、A/D 変換器を搭載した VXI bus とワークステーション上の PCI bus とを MXI bus (Multisystem eXtension Interface Bus) を使って橋渡しすることで高速に大量のデータを転送する。

送られたデータはワークステーション上で、「重力波共通データフォーマット (IGWD)」へとオンラインで 変換され、ハードディスクへ記録される。「重力波共通データフォーマット (IGWD)」は主に、干渉計型重力 波検出器を開発する実験グループ間でスムーズなデータ交換を行うことを目的に制定されたもので、「LIGO」 と「VIRGO」の間で取り交わされた上記フォーマットを、我々も採用することにした。これにより解析に関 わる多くのソフトウェアを共同で開発できる。

#### 3.8.1.4 大容量データ記録部

ハードディスクに一時的に蓄えられた「重力波共通データフォーマット (IGWD)」ファイルは、3時間に 1度程度の割合で DLT (Digital Linear Tape) に転送、保存される。DLT は最近急激に普及したメディアで、 従来の DAT (Digital Audio Tape) に較べると信頼度 / 転送速度 / 容量のいずれの点でも格段に優れている。 DLT の容量には 2000/4000/7000 と現在3つの規格があるが、我々はこの中から現在最も広く普及している DLT 4000 を採用した。この規格では非圧縮時20GB/圧縮時40GBの容量である。この場合、一本の テープには約15時間分のデータが蓄積できる。4

また、大容量データ記録部は「テープ・ロボット」を含んでおり人の手を介さず、先に述べたワークステーションからの命令でテープを掛け替えることが出来る。テープは最大5本までセット出来るので、このシステムでは3日間は人の手を煩わすことなくデータ取得を継続できる。

3.8.2 低速データ取得システム

「低速データ取得システム」は前述の「高速データ取得システム」と

- 1. 測定機器が干渉計に沿って分散している点
- 2. 要求されるサンプリング周波数、測定精度共に高くない点
- 3. 出来る限り多くの情報を安価に取得したい点

で大きく異なっている。

このため、我々は以下のような基本方針を立てた。

- 分散環境に対応するため、ネットワークベースのデータ取得システムを構築する。このために基線長3 00mに渡って光伝送システムを整備しネットワーク、アナログ信号伝送、ビデオ信号伝送を統括的に 行う。
- 2. 常時、ネットワーク上に分散した多チャンネルをモニターするため、安価で処理能力の高い VME シス テムをベースにした「EPICS」を採用する。
- 3. オシロスコープなどの既存の多くの測定機器をサポートするため、Windows ベースで動く「VEE」を採 用する。このシステムでは GPIB LAN gateway を介しての制御機器の遠隔操作など GPIB を用いた計 測器制御が主な用途である。



図 3.8.4: Network および EPICS, VEE システム: EPICS, VEE 共に遠隔地にある測定機器の操作、データ 取得が可能である。違いとしては操作側が Workstation であるか Windows マシンであるかと言う点が挙げ られる。

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>今後、圧縮40GBや DLT 7000 規格での非圧縮35GB / 圧縮70GBへの拡張も可能である。

#### 3.8.2.1 EPICS

「EPICS」は Los Alamos 研究所を中心に開発されたというソフトウェアで、ネットワーク上に分散する 複数 / 多種多様な機器からの情報を収集する分散型データ取得システムを構築する目的で開発された。この 「EPICS」は商用ソフトウェアとは違い、共同開発に参加を表明した研究機関等の間でのみ自由に配布するこ とができる。

このシステムの運用形態は多種多様であるが、我々は VME バスシステムに「CPU ボード」と「ADC/DAC」 などの測定 / 入出力機器を搭載する形態を採用した。これは VME 規格が工業的に広く利用されているため、 多チャンネルのデータ取得 (ADC) ボードを安価に入手可能であるためである。また、「CPU ボード」上で 動く OS として「VxWorks」を採用し、測定機器のドライバー開発や機器のセットアップが容易に行える点 も、我々の選択したこの運用形態の大きな特徴である。

また、我々は、高エネルギー加速器研究機構との共同作業等により国産 VME ボードのドライバー開発に も取り組み、「EPICS 共同開発」にも貢献してきた。



図 3.8.5: EPICS による真空度モニター

現在、真空度、温度、湿度モニターを行っているが、「EPICS – 低速データ取得システム」の整備によって、センサー等の拡充に伴う作業は「データベース」の変更程度で済むようになっている。従って、今後は ユーザーによってセンサーの整備 / 拡充が容易に行える。

#### 3.8.2.2 VEE

「VEE」は HP (Hewlett Packard 社)のソフトウェア製品であり、主に Windows マシンからの計測器制 御を目的に開発された。このため、このシステムでは GPIB を介しての制御 / データ取得をグラフィカルな インターフェイスを用いて比較的容易に行うことができる。具体的には、「GPIB LAN gateway」を導入して GPIB インターフェイスしか持たない測定機器をネットワーク経由で遠隔制御したり、オシロスコープやF FTアナライザーの測定結果を Windows マシンに取り込むことが可能である。

# 3.9 真空

干渉計型重力波検出器においては大気の屈折率の変化による影響を避けるために干渉計全体を真空中に設置する必要がある。TAMA300の目標感度である $5 \times 10^{-20} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$  @300 Hz と同等の変位を与える真空度は $10^{-4}$  Pa 程度であるが、その影響は真空度の平方根に比例するので安全係数を10 とすると必要な真空度は $10^{-6}$  Pa となる。またメインの排気装置として用いられるイオンポンプの保守を考えるとやはり $10^{-6}$  Pa 以下を維持する事が望ましい。

#### 3.9.1 構成

TAMA300 の真空系の構成を図 3.9.1 に示す。TAMA では  $\phi$ 400 mm × 300 m のダクトを直行する腕として 2 組用いるが、加速器などでもこのような大口径長尺ダクトを超高真空用として製作した例は非常に少なく、 その表面処理や材料選択に関して実際の寸法でのデータはほとんどない。またこのような大規模真空系では現 地でベーキングする事は電力設備、経費、安全などの点から現実的でない。以上のような状況で我々はステン レス製 (SUS304L) のダクト内面に ECB(電解複合研磨) による表面処理をし、ノンベークで目標の真空度を達 成する事にした [1]。ダクトは 11 m 単位の長さのものを板厚 0.3 mm、内径  $\phi$ 400 mm の整形ベローズで接続し ている。このベローズは化学研磨により表面を滑らかにした後、水による洗浄と真空中での加熱処理 (930 °C) によって表面の付着物が取り除かれている。バネ定数としては自然長 240 mm に対し軸方向 < 1.3 kgf/mm、 軸垂直方向 < 6 kgf/mm という値を得ている。シールにはメタルガスケット (CEFILAC 社の Helicoflex) を用 いた。

真空槽もステンレス製 (SUS304) でやはり ECB 処理が施されている。排気時に生じる真空槽の歪みや振動が内部の防振系に伝わるのを避けるために Double Balanced Bellows(DBB) という機構が採用されている [2]。なお 8 つの真空槽のうち BS、RM の 2 台は純チタン製で、最近開発された酸化処理によるガス放出の低減化技術 [3] が適用されている。チタンは吸蔵ガス量が少ないとされ将来の真空容器用材料として期待されているが、溶接などが難しく TAMA で用いられているような大型真空槽 ( $\phi$ 1.2 m × 2 m) を製作した例はあまり知られていない。

排気系としては粗排気用に 10001/s のターボポンプを 8 台、定常用に 8001/s のイオンポンプ 16 台を用いている。イオンポンプは 1×10<sup>-5</sup> Pa で維持すれば飽和するのに 57 年かかる計算となる [4]。停電時でも安全性が確保される上、ゲッター作用による排気が持続するので TAMA300 のようなシステムには適している。



図 3.9.1: TAMA300 真空系の構成図。

## 3.9.2 パフォーマンス

現在全ての真空系が稼動しており定常状態の 300 m ダクト中間部で  $2 \times 10^{-6}$  Pa 以下を維持している。図 3.9.2 は西側と北側の 150 m のダクトを排気したときの圧力変化の様子である。排気条件に違いがあるものの 最終的にターボポンプ 2 台とイオンポンプ 2 台で引いている 800 時間後の真空度はほぼ一致している。これ らの結果からダクトのガス放出速度を大まかに見積もると ~  $1 \times 10^{-7}$  Pa m<sup>3</sup>/sm<sup>2</sup>(100 時間) であった。これ は conductance-modulation 法で測定したテスト用 ECB 処理ダクトの同じ排気時間での値に比べて一桁以上 高いガス放出速度となる。これはテストダクトと実際の長尺ダクトでは同じ表面処理を行ってもその後の工程における大気中での放置時間やその雰囲気により表面の状態が異なるという理由だけでなく、測定時の圧力の違いも大きく影響していると思われる [5]。実際、ECB 処理を行なった容器のガス放出速度をオリフィ

スを用いた throughput 法により測定した例として ~ $9 \times 10^{-8} \operatorname{Pam}^3/\operatorname{sm}^2(100 時間)$ の報告があり今回得られた値に近い。これは throughput 法では conductance-modulation 法よりも圧力が高い状態で測定されていることが多く TAMA300 のダクトでの排気条件に近いためと思われる。また大気中での放置時間に関しては150 m ごとの 4 つのセクションの比較からダクト搬入後から接続して排気を開始するまでの時間 (Left time)が到達真空度に影響を与えていることを示唆するデータが得られている。図 3.9.3 は 1998 年 8 月の時点での各セクションの到達真空度と、放置時間 (Left time)/排気時間 (Pump-down time)の関係を見たものである。到達真空度が排気時間によるのは当然としても放置時間にも関連しているのは興味深い。

一方真空槽の方は100時間で~1×10<sup>-5</sup> Paに達したが、この放出ガスのほとんどは大口径フランジに使用しているバイトンガスケットからであることがわかっている。メタルガスケットを用いれば一桁近く改善される可能性があるが、高価なこともあり開閉の多い真空槽でどのように適用していくか今後の課題である。現在は内部にミラー懸架装置やスタックなどの防振系が設置されているが1×10<sup>-5</sup> Pa程度を維持している。これはイオンポンプの寿命の点でも十分満足の行く真空度であり、各部品を真空用に特別に開発するなどした成果の表われであるといえる。

このほか注目すべき点は  $\phi$ 400 mm のダクト部分に窓付きゲートバルブを採用したことによりダクト部を 大気暴露することなく光学系の調整を行なえることである。組み込まれた窓の平行度はバルブの開閉による ビームスポットのずれが外部から調整可能な範囲に収まる精度を有していた。ダクトを再排気する必要がな いため干渉計を大気中で調整した後、真空槽の2~3日の排気で干渉計のオペレートが可能である。



図 3.9.2: TAMA300 における 150 m ダクトの排気特性。

# 参考文献

- [1] Y. Saito, N. Matsuda, Y. Ogawa, and G. Horikoshi Vacuum 47 (1996) 609.
- [2] Y. Ogawa, S. Michizono and Y. Saito Vacuum 44 (1993) 465.
- [3] M. Minato and Y. Itoh JVST A13 (1995) 540.
- [4] 堀越源一郎 東京大学出版会 真空技術 [第3版] (1994) 125.
- [5] Y. Saito, Y. Ogawa, G. Horikoshi, N. Matsuda, R. Takahashi, and M. Fukushima Vacuum 53 (1999) 353.



図 3.9.3: 1998 年 8 月の時点での 150 m ごとの各ダクトの到達真空度と、放置時間 (Left time)/排気時間 (Pump-down time) の関係。

# 3.10 施設

レーザー干渉計全体を収めるための実験施設は図 3.10.1 のように国立天文台三鷹キャンパス内 に設置され、直角二等辺三角形の頂点に位置する3つの実験棟(中央実験棟と西エンド、南エンドの各実験棟)が二 等辺に相当する配管通路によってつながれたL字形をしており、図 3.10.2 に示すように実験床面が地表から約3m下になるような半地下構造をしたものである。実験棟は3つとも地上から出入りできるようになっているが、配管通路は完全に地面下に埋没している。配管通路は両端と中央部の拡幅部(横幅 2.5 m)を除いて内側寸法が高さ2m横幅 1.5 mで、真空パイプの横を人が一人ようやく通れる広さである。

実験棟および配管通路は、重量物である真空システムの搬入と設置および性能試験や保守作業が可能であ ることと、レーザー干渉計を組み上げる作業においてクリーンルーム並の良好な環境が保たれること、さらに レーザー干渉計の運転時に温度変化が小さく外来の振動雑音が十分に遮閉されていることが望ましいが、限 られた予算の中でこれらの要求をすべて満足させることは難しいため、まず設置等の作業が最低限可能で、あ る程度温度変化や外来振動が抑えられるように配慮して、現在の実験施設を建設した。図 3.10.3 は干渉計の 中心部が設置された中央実験棟の平面図である。クリーンな環境については、実験室内部の作業スペースに 部分的にクリーンプースを設置するなどの対策を講じているが、十分とは言えず、現在も搬入用シャッター部 や出入り扉付近の防塵対策を予定している。



配置図 S=1:2000

	図 3.10.1:	TAMA300の設置場所	〒 国立天文台三鷹	キャンパス	Z
--	-----------	--------------	-----------	-------	---



図 3.10.2: TAMA300 中央実験棟



図 3.10.3: TAMA300 中央実験棟の平面図

# 第4章 重力波源とデータ解析

# 4.1 予想される重力波源

4.1.1 重力波の源

重力波の源には

- A) 連星中性子星の合体、
- B) 超新星爆発と中性子星の形成、
- C)新生パルサー、
- D) 大質量ブラックホールの形成と合体、
- E) コスミックストリング、
- F) インフレーション宇宙でのゆらぎ又はバブルの衝突、
- G) 種族 III の星とブラックホール
- H) QCD, Electro-Weak 相転移、
- I) 2 重星そのもの

等がある。(それぞれの詳細については、例えば、文献[1]を参照してください。)しかし、今、問題になるの は TAMA300 が検出する可能性のある重力波源である。ここで、注意すべき点は

- 1) TAMA300 は LIGO の感度の 10 分の1 程度である。
- 2) しかし、2002 年に LIGO が動き出すまでには世界で唯一の高感度重力波干渉計である。
- 1台しかないから重力波の方向は分らない。すると、仮にかかったとして、いかなる物理をだすのかが 問題である。

重力波の源が空間的に一様であるとしよう。検出器の感度を $h_d$ とすると、観測できる重力波源の最大距離 $d_{\max}$ は $h_d^{-1}$ に比例する。重力波源の数は $d_{\max}^3$ に比例するから、検出確率は $h_d^{-3}$ に比例する。これは、 TAMA300の成功確率はLIGOの1000分の1程度であることを意味する。検出器の感度を決めているのは低 温化というようなウルトラ C がない限り、干渉計の腕の長さである。また、建設費が干渉計の腕の長さを決 めているので、おおざっぱに言って検出確率は投入資金の3乗に比例する。TAMA300は12億円でLIGOは 500億円であるから、TAMA300の感度がLIGOの10分の1になれば大健闘であろう。

上にあげたような重力波源に対しては LIGO による検出確率は 1 年間に 10% 程度と考えられるので、単純には TAMA300 の 2 年間の運転による検出確率は、 $2 \times 10^{-4}$ となる。しかし、10% は 100% ではないので LIGO も TAMA300 も重力波を検出することは難しいというのが常識的な評価である。ポイントは TAMA300 の感度は 10 倍悪いが、2 年早く動き出すという点である。

#### 4.1.2 TAMA300 は重力波を検出するか?

最近、理論グループに与えられた大きな課題の1つはTAMA300はどういう重力波源をターゲットにしてデー タ解析等を準備するかという問題であった。TAMA300(2000年1月より本格稼働開始)の後にGEO600(2002 年)、LIGO(2002年)とVIRGO(2002年)が動き出す。さてLIGO(2002年)とVIRGO(2002年)はTAMA300 より10倍程度感度が良いが、それでも達成感度は重力波源としてもっとも有望視されている連星中性子星の 合体時に放出される重力波を年に1回程度検出するには不十分であるとするのが常識的な見方である。LIGO グループ自体もFirst LIGOの改良版である Advanced LIGO ではじめて重力波は検出できると考えているよ うである。つまり、常識的にはTAMA300,GEO600,LIGOとVIRGOは重力波を検出しないであろう。 では、絶対に上の結論は正しいかと言うと、必ずしもそうではない。前提が変れば結論も変ることがある。 つまり、常識ではないことが起これば良い。1つの可能性は確率的に稀なことが起こることである。例えば、 連星中性子星の合体が我々の銀河中で起こることである。もう1つの可能性は理論的に常識的には全く予期 しなかった重力波源が存在する場合である。

我々は後者の可能性を考えて、YES?という結論を得ている。その可能性について、今から述べる。

宇宙にはダークマターが存在する。我々の銀河のハローにも銀河の質量の5倍以上のダークマターが存在 すると言われている。ダークマターが何であるかを極めるべく多くの実験と理論的研究がなされてきたが、現 時点でダークマターの同定はなされていない。

さて、ここ2、3年、ダークマターが太陽質量の半分程度のブラックホールだと言う可能性がマイクロ重力 レンズを用いた観測から示唆されている。もしこれが本当だとすると我々の銀河のハローに1兆個程度のブ ラックホールが存在することになる。太陽質量の半分程度のブラックホールは星の進化の最終段階では作る ことは理論的には不可能である。形成されたのは宇宙の初期で、温度が~1 GeV、時間にして宇宙が始まっ てから10万分の1秒の時に大量の太陽質量の半分程度のブラックホールができたことになる。さて、この ブラックホールは全て単独に存在するのだろうか?我々の銀河のハローに1兆個もブラックホールが存在す るのだからその中には連星ブラックホール(2重星のブラックホール)も存在するのではないだろうか?詳 細な研究の結果1部分はは3体相互作用で連星ブラックホール(2重星のブラックホール)になることがわ かった。<sup>2),3)</sup> 具体的には、軌道長半径 *a* と離心率 *e* に対する分布関数はおおよそ

$$f(a,e) \propto \frac{3ea^{\frac{1}{2}}}{(1-e^2)^{\frac{3}{2}}} \, da \, de.$$
 (4.1.1)

とかける。

連星ブラックホールは重力波を放出して合体する。合体までの時間 t は

$$t = 10^{10} \text{year} \left(\frac{a}{a_0}\right)^4 (1 - e^2)^{\frac{7}{2}},$$
(4.1.2)

と与えられる。ここで

$$a_0 = 2 \times 10^{11} \left(\frac{M_{BH}}{M_{\odot}}\right)^{\frac{3}{4}}$$
 cm (4.1.3)

である。

そこで宇宙初期に出来て、現在合体する連星ブラックホールはどのぐらいの割合かというとわれわれの銀河のハロー中で1年間に0.05個程度と見積られる。この割合では20年に1回である。TAMA300の最終 達成感度だと連星ブラックホールの合体の最後の3分間の重力波を観測することが出来る。その振幅 h<sub>c</sub> は

$$h_c = 4 \times 10^{-18} \left(\frac{M_{\rm chirp}}{M_{\odot}}\right)^{5/6} \left(\frac{\nu}{100 \,{\rm Hz}}\right)^{-1/6} \left(\frac{D}{20 \,{\rm kpc}}\right)^{-1} \,. \tag{4.1.4}$$

と与えられる。ここで  $M_{chirp} = (M_1 M_2)^{3/5} / (M_1 + M_2)^{1/5}$ は "chirp mass" と呼ばれている質量であり、 $\nu$ は重力波の振動数である。このような重力波がやってくれば TAMA300 では S/N~ 400 になる。

波形のデータ解析(次節で詳細の説明される)から個々のブラックホールの質量を決めることが出来る。その質量が太陽質量の半分程度であればブラックホールとしてのダークマターの確認という大成果になりうる。 波形から質量を決めるだけだから、理論から得られる template があれば1台の干渉計でも可能である。重力 波の方向はわからなくても良い。

もし以上の推論が本当なら、10%の確率(5%×2年)でTAMA300は世界で最初に直接重力波を検出する可能性がある。そして、現代宇宙物理学の最大の謎を解くとともに重力波を通して宇宙の最初の10万分の1秒に何が起こったかを明らかにしてくれるかも知れないのである。

#### 4.1.3 連星中性子星の合体

ハルスとテイラーは連星パルサー PSR1913+16 の軌道周期が重力波放出のために減少していることを確認した。彼らは 1993 年にノーベル物理学賞を受賞した。LIGO がもっとも有望と考えている重力波の源は PSR1913+16 のような連星中性子星の合体である。問題は合体のおきる割合であるが 2 つの方法で評価されている。第 1 の方法は PSR1913+16 を始めとする現実に観測されている連星パルサーのデータを使って合体率を出す。さて、連星パルサーはもともとは質量の大きい星の連星から出来ると考えられている。第 2 の方法では、質量の大きい星の連星から出発して星の進化の理論を用いて連星中性子星の合体率を理論的に出す。どちらの方法にも多くの不定性があるが、 $10^{-6} \sim 2 \times 10^{-5}$ /年/銀河という範囲で両者の評価は一致している。TAMA300 の感度では連星中性子星の合体が我々の銀河中かせいぜいアンドロメダ銀河で起こったときにしか観測できない。したがって検出確率は 10 万から 100 万分の 1 である。しかし、確率はゼロではないから TAMA300 でも考えることにする。

連星中性子星 (NS-NS) の場合両星の質量は  $1.4M_{\odot}$  程度であるが連星の進化の理論からは、中性子星ーブ ラックホール連星 (NS-BH)、ブラックホール-ブラックホール連星 (BH-BH) も形成される。形成率は連星 中性子星と同程度と考えられている。実際にそのような連星の観測例はないので、この理論予測は確かめら れていない。さて、ブラックホールの質量は中性子星より重いので、式 4.1.4 より同じ距離にあるとすると NS-BH、BH-BH 連星の方が NS-NS 連星より重力波の振幅が大きい。逆に検出器の感度が決まっているとす ると NS-BH、BH-BH 連星の方が遠くまで観測できることになり、検出確率が一般的には上がる。(重力波源 の数は距離の 3 乗に比例するするから。) TAMA300 では、残念ながらこの効果はせいぜいファクター 2 程度 である。

連星中性子星の合体はガンマ線バーストのご本体かも知れないと言われている。もしそうなら、TAMA300 が重力波を検出したときに、ガンマ線バーストが起きているはずである。ガンマ線バーストの標準的な火の 玉モデルが正しいとすると、重力波の1秒後程度にガンマ線の放出が始まるはずである。

#### 4.1.4 超新星爆発と重力波

超新星爆発は1銀河あたり100年に1回程度発生するから重力波の源になりうる。問題は、非球対称な重力崩壊に伴う中性子星またはブラックホールの形成が起きなければならない。この割合が不明である。ただ、最近観測からこの割合を決められるかも知れない可能性が出てきた。ソフトガンマ線リピーターが強い磁場(~10<sup>15</sup>G)を持った中性子星である可能性が出てきた。さて、この強い磁場の起源であるが、誕生時に中性子星がミリ秒程度の高速回転をしていた時にダイナモで出来たとする考えがある。この場合、中性子星の形成の前の重力崩壊は確実に非球対称であったことになる。ソフトガンマ線リピーターの生成率は1000年に1回程度と見積もられているので、確率 0.2%でTAMA300 は超新星爆発とそれに伴う中性子星またはブラックホールの形成時の重力波を検出できる。問題は振幅であるが、源までの距離を10kpc として  $h_c \sim 10^{-20}$  @500Hz となり TAMA300 でぎりずり可能である。ただしこれは軸対称とした場合で分裂等の非軸対称なことが起こると、最大  $h_c \sim 10^{-18}$  @500Hz となる。<sup>1)</sup> これは TAMA300 で S/N~100 を意味する。この場合重要な点はニュートリノが SuperKamiokande でかかるはずであるから、波形はわからなくても,時間が分かるのでデータ解析は可能であろう。

#### 4.1.5 重力波の源の天球上での位置は1台の干渉計で決まるか?

答は NO である。 L 字型の重力波検出用レーザー干渉計の指向特性は干渉計の2つの腕で決まる面に垂直 な方向の感度が良い。しかし、垂直方向からずれても急激には感度は落ちないから1台だけで方向を決める ことはバースト的な重力波源に対して特に困難である。2 台あると、重力波の到着時間の差を利用すると、天 球上の円のどこかということが決まる。もう1台あると、もう1つ別の円上のどこかということになる。そ うすると2つの円の交点として重力波の位置が決まる。交点は2つあるが重力波の2つの偏波成分の自由度 を考慮すると重力波の源の天球上での位置と重力波の2つの偏波成分の時間変化を決定することが出来るこ とがわかる。つまり重力波を観測して物理学と天文学をするには最低3台の高性能な巨大レーザー干渉計が 必要である。最近の素粒子論でのスーパーストリング理論からは、アインシュタインの重力理論ではなく、ブ ランス – ディッケ理論が出てくるのではないかと言われている。ブランス – ディッケ理論にはメトリックテ ンソル以外にもアインシュタインによる一般相対性理論にはないスカラー場が存在する。この場合重力波の 偏波成分は3になる。そうすると重力波の源の天球上での位置と重力波の3つの偏波成分の時間変化を決定 するには最低 4 台の高性能な巨大レーザー干渉計が必要である。仮にブランス – ディッケ理論が正しくなく ても4台という数字には大変重要な意味がある。干渉計の2つの腕が決める面内では感度が大変悪い。特に 45度の方向では感度は全くない。このことを反映して3台の干渉計が決める面内に近い重力波源にたいして は位置と重力波の2つの偏波成分の時間変化の決定精度が落ちる。どこから来る重力波に対しても位置と重 力波の2つの偏波成分の時間変化を精度良く決定するにはどうしても4台以上必要なのである。

つまり4台の高性能な巨大レーザー干渉計が建設されれば、重力波がもたらす情報を得るための体制が整い、来世紀には重力波物理学(天文学)は大いに発展する事が期待される。このためにもLCGTと言う日本の将来計画は注目を集めている。

#### 参考文献

- [1] 中村卓史,三尾典克,大橋正健編:重力波をとらえる(京都大学学術出版会,1998) p.1-p417.
- [2] Nakamura, T., Sasaki, M., Tanaka, T., & Thorne, K. S. 1997, ApJ, 487, L139.
- [3] Ioka, K., Chiba, T., Tanaka, T., & Nakamura, T. 1998a, Phys. Rev. D, 58, 063003.

#### 4.2TAMA の感度スペクトラム予想

TAMA Phase-I の重力波の大きさh に換算したノイズスペクトラムは、図 4.2.1 のように見積もられてい る。この見積もりは現行 TAMA の防振系、典型的な地面振動、鏡の質量、振り子や鏡の共鳴周波数、レー ザー出力、Fabry-Perot キャビティの Finesse 値などを用いて解析的な式により予想されたものである。周波 数帯によって支配的なノイズ源が違っていることは一般のレーザー干渉計と同じである。

特に解析の立場から見ると、デザイン時点での TAMA の最終的な到達目標 (Phase-II) と比較して 100-200 Hz 付近での振り子の熱雑音が相対的に目立つことである。これは比較的感度のよい帯域においてすらスペク トルがフラットでないと言うことであり、resamplingのやもっと直感的な事象選別方法の際に多少の邪魔と なる。Matched Filter の場合であっても、多くの energy flux<sup>1</sup>を含む周波数帯域で損をしており、もっと最高 感度を低域に向けたほうが有利である。こうしたことはこのノイズスペクトラムを種にした Monte-Carlo シ ミュレーションでわかってきた。



図 4.2.1: TAMA Phase-I 運転の予想スペクトラム

#### 連星合体による重力波 4.3

TAMA Phase-I で探索候補として挙げる2重星合体重力波源は、

- $1.\;10 M_\odot$  BH  $10 M_\odot$  BH
- 2.  $1.4 M_{\odot}~{\rm NS}$   $10 M_{\odot}~{\rm BH}$
- $3.2.4M_{\odot}$  BH  $1.4M_{\odot}$  NS
- $4.~1.4M_{\odot}^{'}$  NS  $1.4M_{\odot}^{'}$  NS (平均的な質量の中性子星連星)  $5.~0.5M_{\odot}$   $0.5M_{\odot}$  (MACHO 連星 )

である。TAMA の感度によるフィジビリティを考えると、最後の MACHO 連星が特に有望な重力波源であ ると考えて良い。それぞれの場合についての波形予想や、S/N、計算リソースの研究が行われた。

#### 4.3.1波形・スペクトラム予想

2重中性子星の合体時に放出される重力波については、ポスト=ニュートン近似の手法を用いて計算される。 軌道を小さくしながら合体に至るため、重力波の周波数、振幅ともに大きくなりながら最後にいたる Chirp と呼ばれる波形になる。図 4.3.2 に典型的な例を示す。図 4.3.3 は前述の質量の組み合わせについて、1 Mpc 離れた源の重力波のスペクトラムを計算したものである。ただし検出器の応答として、TAMA のアンテナパ

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>strain h のスペクトルは  $f^{-7/6}$ 、  $f^{-7/6}$ 、  $f^{-1/3}$  となる

#### ターンの全天平均である $1/\sqrt{5}$ をかけてある。



図 3.3: 図 (3.1)、(3.2) における時刻 (t=-0.01 — 0 [sec])の  $h_+$ 、 $h_\times$ の拡 大図。縦軸は重力波振幅h[無次元]、横軸は時間 [sec] である。実線が  $h_+$ 成分、破線が  $h_\times$ 成分である。cutoff 時刻が -0.001 秒のためそれ以降は振幅は 0 とした。

図 4.3.2: 2 重星合体重力波の例



図 4.8: 質量の異なる重力波の振幅スペクトル密度。縦軸は振幅のスペクトル密度 [1/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ]、横軸は周波数 [Hz]である。グラフ上のスペクトル密度は上から順 に質量  $10M_{\odot} - 10M_{\odot}$ 、 $10M_{\odot} - 1.4M_{\odot}$ 、 $2.4M_{\odot} - 1.4M_{\odot}$ 、 $1.4M_{\odot} - 1.4M_{\odot}$ 、 $0.5M_{\odot} - 0.5M_{\odot}$ の場合の振幅スペクトル密度である。



#### 4.3.2 Monte-Carlo 法による信号シミュレーション

前述のような信号をある種の検出方法によって処理したときに、どのていどの事象選別が得られるかは振幅のスペクトルだけをみてもわからない。実際には位相を含めての処理がなされるからである。実際に雑音を含む信号を解析してみることが肝要である。しかしながら実際の検出装置が動くまで手をこまねいているわけには行かないし、こうした稀な現象を相手にする場合は実働していても較正の基準となる事象を得るまでに時間がかかる。そのためにシミュレーションを用いることが考えられた。

レーザー干渉計全体は複雑な要素の絡まり合いであり、全ての要素から素過程を積み重ねて信号をシミュ レートするのは難しい。今回は予想スペクトラムを元に、2つの物理的な仮定を入れてノイズ波形をシミュ レートした。

- 1. ノイズスペクトラムにおいて、各 bin の位相は全く相関性がない
- 2. 振幅は短時間においては  $\sqrt{2\pi f}$  程度の揺らぎを持つ
- 3. ガウス型のノイズであり、非線形な効果は考えない

4. 位相、振幅揺らぎは時系列のノイズを生成する毎に上記に従う乱数を用いる

以上を仮定として、ノイズをシミュレートした。この方法は位相と振幅揺らぎを乱数で導入した点でわかる ように、Monte-Carlo 法である。従ってノイズそのものの効果の見積もりにも、多数のサンプルを必要とす

#### る。図 4.3.4 はノイズを合成した重力波波形の例である。



図 4.3.4: 典型的な重力波信号とノイズのシミュレーション波形 :時系列の信号と、それを FFT をおこなってスペクトルを求めたもの。意図した通りの疑似信号生成がなされている。

#### 4.3.3 Matched Filter

chirp 波形のように、位相・振幅がしっかりと予言できる場合には Matched Filter 法を用いることが出来る。 基本的には 2 つの信号の相関函数を計算するのと等価である。観測波形 s(t) と予想する重力波テンプレート 波形 h(t) との間で相関値 c を

$$c = \int_{-\infty}^{\infty} h(t - \tau) \cdot s(t) \, dt \,, \qquad (4.3.5)$$

と求めることが出来る。ここで  $\tau$  は時刻のずれである。実際の信号はノイズ n(t) を含んでいるのだから、観測された真の重力波波形  $h_{\text{observed}}$  と信号の間には、

$$s(t) = h_{\text{observed}} + n(t) \tag{4.3.6}$$

という関係になる。式 4.3.5 をフーリエ変換してやれば、周波数 f についての積分で

$$c(\tau; m_1, m_2, \phi, \cdots) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t - \tau) \cdot s(t) dt$$
  
= 
$$\int_{-\infty}^{\infty} \tilde{h}^*(f) \cdot \tilde{s}(f) e^{-2\pi i f \tau} df$$
(4.3.7)

と表すことが出来る。ここで  $\tilde{s}(f)$  と h(f) は s(t) と h(t). のフーリエ変換である。ノイズの大きさが周波 数帯によって異なることを考えると、それに依存した規格化を行えばよく、ノイズのパワースペクトル密度  $\tilde{n}(f)$  を用いる。規格化された Matched Filter の出力は、

$$c = \int_{f_1}^{f_2} \frac{\tilde{h}^*(f) \cdot \tilde{s}(f)}{|\tilde{n}(f)|^2} e^{-2\pi i f \tau} df.$$
(4.3.8)

となり、この値を最大にするテンプレート波形 h(t) が最も尤もらしい重力波ということになり、cの大き いほど確からしい、ということになる。

図 4.3.5 に、上記シミュレーションを用いての Matched Filter 出力 c の分布を示す。ノイズだけの場合は  $\sigma = 1$  に規格化されたガウス分布となり、有為な大きさの重力波があれば大きな S/N =  $c/1\sigma$  となって現れる。図 4.3.6 には標準的な 2 重中性子星について、検出器の天頂入射で距離が変化したときの S/N 値を示す。このグラフが事実上の検出限界距離を示唆している。例えば S/N=10 を閾値とすれば、1Mpc が限界である ことがわかる。

#### 4.3.4 計算リソース

Matched Filter の場合、テンプレート数などの計算リソースが深刻な問題となる。TAMA では阪大を中心 に段階的サーチの方法が検討されている。



図 4.3.5: Matched Filter 出力のヒストグラム



図 4.3.6: Matched Filter 出力の距離依存性

#### 4.3.5 Resampling

Resampling は仮定した重力波の周波数発展にそって、ADC のサンプリングを chirp 波形が正弦波に見え るように間引く方法である。処理や事象のシンプルさから TAMA でもテストしてみた。結果は S/N の上で は Matched Filter に及ばず、計算時間の上でも若干有利な程度であることがわかった。図 4.3.7 にこの方法 での距離と S/N を示す。ただし、オンラインでの大まかな選別などには使える可能性もある。

# 4.4 時刻精度と重力波源の方向決定精度

重力波源の方向決定にはいくつもの要素があり、また1台の検出器で決められるものではない。ここでは あくまで時刻決定精度がどう誤差伝搬するかを記しておく。

TAMA のデータ取得系で用いる IRIG-B 信号のデコード、ゼロクロス解析により、時刻の決定精度は 0.05  $\mu$  sec 程度以下であると見積もられた。(ただしケーブル遅延などのオフセットは固定値として考えず、決定 の揺らぎである。)例えば図 4.4.8 のように 2 つの検出器の到着時間差で方向を決められるが、仮にこの時刻 決定精度のみが効くとすると、最も良いケース<sup>2</sup>では誤差は 1.8  $\mu$  rad 程度になる。

この誤差は偏波成分の分解などについて概ね予想される誤差よりもずっと小さく、TAMAの解析において時刻制度は十分であるという知見を得た。

<sup>22</sup>台を結ぶ基線長の垂直方向での入射の場合。基線長方向では原理的に決められないので、ここでは最も良いケースで議論する。



図 4.3.7: Resampling 出力の距離依存性



図 5.1:2 つの重力波検出器の到達時刻の違い

図 4.4.8: 2 重星合体重力波の例

# 第5章 TAMAの応用研究とR&D

# 5.1 300mFP 共振器をもちいた絶対長測定実験

#### 5.1.1 はじめに

TAMA 計画では基線長 300m のレーザー干渉計を用いて最終的に  $h \sim 3 \times 10^{-21}$  の重力波検出感度の達成 をめざしているが、これは基線長の変化にして  $10^{-18}$ m に相当する。そのため、干渉計で使用される鏡は地 面振動などの外来の振動から良く防振されていなければならず、さらに干渉計を正しく機能させるために鏡 は適当な動作点になるように位置制御される。

300m という長基線の干渉計では、鏡の懸架システムそのものの変動以外に地面のひずみ変動によっても基線長が変化し、鏡の位置制御範囲を越えてしまう可能性があるため、鏡の制御系の設計には TAMA サイトでの地面のひずみ変動のデータが必要となる。われわれは TAMA のモードクリーナーの RF 変調透過実験でもちいられた技術を応用して、300m Fabry-Perot 共振器の基線長を約1 µ m の精度で測定することに成功し、地下水汲み上げにともなう地面のひずみ変動をとらえた。この方法は2点間の距離変動を検出するだけでなく距離の絶対値が測定できるため、一般の精密測距や固体地球物理学へも応用できる技術である[1]。

#### 5.1.2 測定原理

従来の変調法を使った距離測定はレーザー光に RF の強度変調をかけて、入射光の RF の位相と測定点に 置かれた鏡からの反射光の位相との比較から測定点までの距離 *L* を

$$L = \frac{c}{2\nu_{\rm m}} (\frac{\phi}{2\pi} + N)$$

と求める [2]。ここで、c,  $\nu_m$ ,  $\phi$ , N はそれぞれ光速度、RF 変調周波数、入射光と反射光の RF の位相差、往 復光路中の RF 変調波の数である。N は整数であるから、距離の決定精度は

$$\delta L = \frac{c}{2\nu_{\rm m}} \frac{\delta\phi}{2\pi}$$

のように RF の位相の決定精度で与えられる。

位相精度を上げるために、われわれは以下のように Fabry-Perot 共振器の共振時の急峻な位相特性を利用した。振幅反射率がrの二枚の鏡による Fabry-Perot 共振器では、共振状態にある入射光の周波数変化  $\delta \nu$  に対して

$$\delta\phi \simeq \frac{\mathcal{F}}{\pi} \left(\frac{2L}{c}\right) 2\pi\delta\nu$$

のような位相変化を生じる。ここで、フィネス

$$\mathcal{F} = \frac{\pi r}{1 - r^2}$$

をもちいた。入射光に周波数  $\nu_m$  の弱い変調をかけると  $\nu \pm \nu_m$  の sideband が生じるから、その変調周波数 変化と共振器長との関係

$$\frac{\delta\nu_{\rm m}}{\nu_{\rm m}} = \frac{\delta L}{L}$$

を使うと共振器長の決定精度は

$$\delta L \simeq \frac{\pi}{\mathcal{F}} \left( \frac{c}{2\nu_{\rm m}} \right) \frac{\delta \phi}{2\pi}$$

となり、単純往復の場合と比べると精度が  $\mathcal{F}/\pi$  倍向上することがわかる。これは Fabry-Perot 共振器の共振 特性のために等価的に位相決定精度が向上するためであり、高フィネス共振器ほどその効果は大きくなる。 このような Fabry-Perot の共振特性を利用するために、われわれは以下の3つのステップによりこの方法 を実現し、TAMA 干渉計の東西の 300m Fabry-Perot 共振器長を求めることに成功した。

- 1. レーザー光の carrier を Fabry-Perot に共振させる 入射光に位相変調 (15.25MHz) をかけ Pound-Drever-Hall 法 [3] により誤差信号を取得して、これをレー ザーの周波数制御端子に feedback することにより carrier を Fabry-Perot にロックした。
- 2. Sideband( $\nu \pm \nu_m$ )が共振するように変調周波数  $\nu_m$ を制御 1. とは違う周波数の位相変調 ( $\nu_m =$ 約 12MHz、可変)を入射光にかけ、生じた sideband が Fabry-Perot に共振するように変調周波数を制御した。誤差信号を得るために、carrier に微小な周波数変調(変調周 波数  $\nu_n$ )をかけて、反射光を  $\nu_m$  と  $\nu_n$  で 2 回復調する方法を行った [4]。これは TAMA 計画のモードク リーナー実験で開発されたオリジナルな方法である。
- 3. 共振の次数 (*m*) と  $\nu_{\rm m}$  より

$$L = m \frac{c}{2\nu_{\rm m}}$$

の関係から共振器長の絶対値を求めることができる。共振の次数は共振器長(約 300m)および変調周波数(約 12MHz)よりm = 24と求められる。したがって、位相変調周波数 $\nu_m$ を周波数カウンターでモニターすることにより距離の変化を共振器長の絶対値の時間変動として検出することができる。周波数計測の精度がこの測定の絶対精度に影響するために、周波数カウンターはGPS時間基準に同期させたものを使用した。

#### 5.1.3 観測結果

共振器長の観測は 1998 年 3 月 13 日から 23 日まで約 10 日間行われ、図 5.1.1(a) に示すような共振器長の 変動が認められた(図 5.1.1(a) は 3 月 19 日から 23 日を示す)。1 日 12~13 回の 20µm 程度のスパイク状の 変動および数日にわたるゆっくりとした変動があることがわかる。

図 5.1.1(b) は図 5.1.1(a) の拡大図であるが、スパイク状変動は 30 分以内に急激に立ち上がりその後 1 ~ 2 時間程度で緩和するような波形を持っていることがわかる。この変動は実は TAMA 検出器の近くの民間の地下水汲み上げポンプの動作状態と同期していることがわかり(図 5.1.1(c)) 地下水汲み上げにともなう地面の伸縮であることが判明した。

また、ゆっくりとした変動については気温と相関が認められ、鏡の防振系のスタック [5] が温度変化により 変動することで説明がつけられることがわかった。

#### 5.1.4 まとめ

本実験の Fabry-Perot 共振器の絶対長観測により、300m 共振器の変化として~20µm/(30min) 程度のかな り急激な変動があり、地下水汲み上げにともなう地面のひずみ変動 [6] であることがわかった。この共振器長 変動に対しては鏡の actuator として、従来のコイルのほかに可動範囲の広い actuator を併用する方法が検討 されている。

この実験の意義としては上記の目的が達成されたことのほかにもいくつか TAMA 計画および他分野への応用面について重要と思われる成果があったので、それらを以下に挙げる。

- TAMA で開発していた Wave Front Sensing 法によるアラインメント制御 [7,8] が試行され、観測期間 中ほとんど連続的に制御が持続する安定性を示した
- TAMA の重力波検出に向けて、観測シフト体制がこの機会に約1週間試行された。その中で夜間の待機などいくつかの問題点が見いだされたが、今後解決策を検討していく必要がある
- 絶対長の測定原理を利用して校正が行われた。それにより、レーザーの周波数変調指数や actuator の 係数など重要なパラメーターが決定された
- 本方法は RF 周波数基準を利用して距離測定を行うものであるが、フィネスのより高い Fabry-Perot 共振器を用いればさらに高精度化が可能で、精度の高い時間基準を最大限に利用する測距法として一般計測に応用可能である
- 本測定で地面のひずみを検出できたことからわかるように、新しい地殻変動検出法として利用可能である。伸縮計 [9,10] などで2点間の距離を基準距離(長さ)からの変動で測る、従来の相対的な測定は 長期的なドリフトや地震時にデータの不連続が発生するといった問題をともなう。これらを高精度な絶対距離測定により改善できる可能性が大きい

# 参考文献

- A. Araya, S. Telada, K. Tochikubo, S. Taniguchi, R. Takahashi, K. Kawabe, D. Tatsumi, T. Yamazaki, S. Kawamura, S. Miyoki, S. Moriwaki, M. Musha, S. Nagano, M.-K. Fujimoto, K. Horikoshi, N. Mio, Y. Naito, A. Takamori, and K. Yamamoto, "Absolute-length determination of a long-baseline Fabry-Perot cavity by means of resonating modulation sidebands," Appl. Opt. 38, 2848-2856 (1999).
- [2] E. Bergstrand, "Distance measuring by means of modulated light," Bull. Géod. 24, 243-249 (1952).
- [3] R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski, J. Hough, G. M. Ford, A. J. Munley, and H. Ward, "Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator," Appl. Phys. B31, 97-105 (1983).
- [4] S. Telada, "Development of a mode cleaner for a laser interferometer gravitational wave detector," Doctor thesis (Department of Astronomical Science, The Graduate University for Advanced Studies, Tokyo, 1997), pp. 32-38.
- [5] R. Takahashi, F. Kuwahara, and K. Kuroda, "Vibration isolation stack for TAMA300," in Gravitational Wave Detection: proceedings of the TAMA international workshop on gravitational wave detection, K. Tsubono, M.-K. Fujimoto, and K. Kuroda, eds. (Universal Academy Press, Tokyo, 1997), pp. 95-102.
- [6] S. Takemoto, H. Doi, and K. Hirahara, "Observation of ground-strains using a laser extensioneter system installed in shallow trenches," J. Geod. Soc. Japan 31, 295-304 (1985).
- [7] E. Morrison, B. J. Meers, D. I. Robertson, and H. Ward, "Automatic alignment of optical interferometers," Appl. Opt. 33, 5041-5049 (1994).
- [8] K. Tochikubo, A. Sasaki, K. Kawabe, and K. Tsubono, "Automatic alignment control for the TAMA interferometer," in *Gravitational Wave Detection: proceedings of the TAMA international workshop on gravitational wave detection*, K. Tsubono, M.-K. Fujimoto, and K. Kuroda, eds. (Universal Academy Press, Tokyo, 1997), pp. 365-367.
- [9] H. Benioff, "A linear strain seismograph," Bul. Seis. Soc. Am. 25, 283-309 (1935).
- [10] V. Vali and R. C. Bostrom, "One thousand meter laser interferometer," Rev. Sci. Instrum. 39, 1304-1306 (1968).



図 5.1.1: 観測された 300m Fabry-Perot cavity の絶対長変化

# 5.2 パワーリサイクリング

現在世界で進められている4つのレーザー干渉計重力波検出器建設プロジェクト (LIGO, VIRGO, GEO, TAMA)では、いずれもパワーリサイクリング (power recycling)技術を導入することになっている。これは、 干渉計に入射されるレーザー光強度を増加させ、干渉計の主要な雑音の一つである散射雑音レベル (shot noise level)を改善するためである。通常、干渉計型重力波検出器は、マイケルソン (Michelson)干渉計の両腕から の反射光がビームスプリッターの光検出器側で打ち消し合う (暗編)状態で動作される。この状態では、ビー ムスプリッターのレーザー光源側では両腕からの光は強め合う (明編)ことになり、干渉計に入射されたほぼ 全ての光が光源側に打ち返される。ここで、レーザー光源とビームスプリッターの間に鏡を置き、この光源 側に戻ってきた光を再度、干渉計に入射することで、干渉計に入射される光強度を増大させ、その散射雑音 レベルを改善するのがパワーリサイクリングの原理である。

しかし、実際の干渉計型重力波検出器においてパワーリサイクリングを実現するためには解決すべき問題 も多く残されている。その一つとして干渉計制御の問題がある。干渉計が高い感度で動作するためには、最適 な動作点に制御することが不可欠である。しかし、パワーリサイクリングを行った干渉計重力波検出器では、 この制御に用いる信号を分離して取得することは容易でない。また、干渉計を制御されていない状態から、制 御によって線形応答を示す動作点に引き込むこと(ロックアクイジション,lock acquisition)が可能かどうか は、パワーリサイクリング実現における大きな不確定要素とされていた。もう一つの問題点として、光学部 品の問題がある。パワーリサイクリングによる光強度の増幅の割合(リサイクリングゲイン,recycling gain) は、干渉計内部での光損失に反比例する。そのため、高いリサイクリングゲインを得るためには光損失の少 ない鏡で干渉計を構成することが必要となる。さらに、干渉計を構成する光学部品の角度揺れ(ミスアライン メント)によっても干渉計内部での実効的な損失が増加してしまう。そのため、高いリサイクリングゲインを 得るためには鏡の姿勢制御(アラインメントコントロール)系の開発が不可欠となる。

これらの問題点を解決するために、光学素子が懸架されたプロトタイプ干渉計を用いた研究開発が進められてた。東京大学理学部にある基線長3mのプロトタイプ干渉計では、干渉計の動作と制御の研究が進められた。また、国立天文台三鷹にある基線長20mのプロトタイプ干渉計では、高いリサイクリングゲインの実現を目指して、干渉計に用いる鏡や、干渉計のアラインメントコントロール系の開発が行われた。以下に、これらの研究開発で得られた実験結果を述べる。



図 5.2.1: 3m プロトタイプ干渉計の光学系と制御系。

## 5.2.1 3m プロトタイプ干渉計におけるパワーリサイクリング

東京大学理学部では、基線長 3m のプロトタイプ干渉計を用いて研究を進めている。これは、両腕に長さ 3m のファブリー・ペロー (Fabry-Perot) 共振器を持つマイケルソン干渉計であり、パワーリサイクリングが 組み込まれている (図 5.2.1)。干渉計を構成する鏡とビームスプリッターは二重振り子によって懸架されてお り、干渉計は真空槽に収められている。光源としては出力 50mW の Nd:YAG レーザーを用いている。制御の

ための信号は frontal modulation 法で得ており、さらに、光学パラメータの調整を行うことでこれらの信号 の分離を行っている。この基線長 3m のプロトタイプ干渉計を用いて、レーザー干渉計重力波検出器におけ るパワーリサイクリング技術の開発、特に、パワーリサイクリング実現において重要となる干渉計制御の問 題について研究を進めた。

実際の干渉計型重力波検出器では、自由質点として振舞わなければならないという原理的な要請から、鏡 等の光学素子は振り子によって吊るされる。この振り子は、重力波観測周波数帯においては地面振動からの 防振の働きも持っているが、振り子の共振周波数付近では、光学素子は外乱によって大きく揺らされてしま う。従って、干渉計を高い感度で動作させるために、光学素子を精密に制御することが不可欠となる。パワー リサイクリングを行った干渉計重力波検出器では、複数の共振器がお互いに結合した構成になっているため、 この制御に用いる信号を分離して取得することは容易でない。また、制御されていない干渉計は、光学素子 の変動に対し複雑な非線型の応答をするため、制御されていない状態から、制御によって線形応答を示す動 作点に引き込むこと (ロックアクイジション)が可能かどうかは、パワーリサイクリング実現における大きな 不確定要素とされていた。

本研究では、実際のレーザー干渉計重力波検出器と同様な光学系を持ち、鏡等が懸架された基線長3mの プロトタイプ干渉計においてパワーリサイクリング制御技術の開発を行った。本研究は次の3つの目的を含 んでいる。第一は、基線長3mプロトタイプ干渉計においてパワーリサイクリングを実現することである。本 研究以前にもパワーリサイクリング実験は行なわれてきているが、それらはテーブルトップでの固定鏡を用 いた実験、または、懸架された単純マイケルソン干渉計での実験のみであった。3mプロトタイプ干渉計は、 LIGO, VIRGO, TAMA と同様のファブリー・ペロー型マイケルソン干渉計であり、その鏡・ビームスプリッ ターは振り子によって懸架されている。この3m干渉計においてパワーリサイクリングを実現し、そのロック アクイジション過程を研究することは、プロトタイプ干渉計としては最初の成果になるばかりでなく、各プ ロジェクトの大きな不確定要素の一つを取り除くことになる。第二の目的は、制御信号の分離取得法の開発 である。パワーリサイクリングを行ったファブリー・ペロー型マイケルソン干渉計が動作するためには、光 路長方向の4 自由度の制御が不可欠となる。しかし、この制御信号を分離して取得することは容易ではない。 この問題を解決するため、各プロジェクトで、さまざまな手法が考案・研究されている。本研究では、光学 パラメータの調節による信号分離法を新たに考案し、試みている。これについては後の信号分離技術の開発 (5.3 節)で述べられる。第三の目的は、パワーリサイクリングの効果による干渉計感度の向上である。干渉計 型重力波検出器において、パワーリサイクリングは散射雑音レベルを改善させるために導入される。従って、 散射雑音レベルの改善を確認するとともに、パワーリサイクリングの導入が干渉計雑音に与える影響を研究 することが必要となる。



図 5.2.2: 3m プロトタイプ干渉計の動作。数時間程度の非常に安定な動作を実現している。

実験の結果、この 3m プロトタイプ干渉計においてパワーリサイクリングの実現に成功した。これは、懸架 されたファブリー・ペロー型マイケルソン干渉計においては世界初の成果である。図 5.2.2 は、干渉計動作時 の光強度変化を表している。上図は、ビームスプリッターに入射する光強度、また、アームキャビティーに共 振する光強度が、パワーリサイクリングによって、増加していることを表している。また、図 5.2.2 より、干 渉計が数時間程度非常に安定に動作していることが分かる。この測定では干渉計内の光強度変化は、約 1%程 度であった。 ロックアクイジションについては、2通りの手法を試みた。その一つは、補助的な制御系でアームキャビ ティをロックしてからビームスプリッターとリサイクリングミラーを制御するものである。この手法は、干 渉計のミスアラインメント等が多少あっても動作点に引き込むことが可能であった。もう一つの手法は、制 御系を動作させると、干渉計が動作点に自動的に引き込まれるというものである。干渉計が自動的にロック されていく様子は、LIGOグループ内でシミュレーション解析されているものと一致した。



図 5.2.3: 測定された 3m プロトタイプ干渉計の変位感度。

測定された干渉計変位感度は、最も良い周波数帯で $2 \times 10^{-17} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ であった (図 5.2.3)。この感度を制限している雑音源は特定できていないが、鏡の固定方法に起因していると推定されている。この雑音のため散射雑音レベルを直接確認できなかったが、パワーリサイクリング導入前と比較すると、散射雑音レベルが改善されるとともに、信号が増大するのに伴って検出系の雑音が低減されることが確かめられた。また、雑音解析の結果、リサイクリングミラーを導入した際に増大すると考えられる強度雑音や信号の混入による雑音は、感度に影響を与えていないという結論が得られた。

以上より、3m プロトタイプ干渉計を用いて進めたパワーリサイクリング制御系の開発は当初の目的をほぼ 達成したといえる。

## 5.2.2 20m プロトタイプ干渉計のパワーリサイクリング

重点領域研究「重力波天文学」の一つの柱として国立天文台三鷹に建設された基線長 20m のレーザー干渉 計は、赤外光源の利用、リサイクリング可能な光再結合、変調透過型独立懸架モードクリーナーなどの最先端 技術を世界に先駆けて実装してきたプロトタイプ干渉計である [4]。フルスケールのレーザー干渉計の光学設 計のために必要な最後の技術としてリサイクリング実験をおこなった。光学系は図 5.2.4 のようになっている。 リサイクリングをする上で最も重要な指標はリサイクリングをすることによる光強度の増幅の割合(リサ イクリング・ゲイン)である。その干渉計の光学設計で到達可能なゲイン G の最大値は近似的に干渉計全体 としての光損失  $L_T$  を用いて  $G_{\max} = L_T^{-1}$  と表されることから、高い利得を得るには干渉計の光損失を小さ く抑えなくてはならない。腕にファブリー・ペロー共振器を組み込んだタイプの干渉計では共振器反射率を 充分大きくとれないことから、例えば TAMA のデザインでゲイン 10 となっている。すなわちこれは、干渉 計の光損失を 10%以下に抑えなくてはならないことを意味する。世界でも吊った鏡の干渉計で 10 を越える ゲインが報告された例はなく、ファブリー・ペロー型のマイケルソン干渉計で高い利得を実現するのは困難 な問題が多かった。プロトタイプクラスの干渉計で高いゲインを実現するために主に問題になってきたのは、 ビームが大きく広がることによって鏡の広い領域での性能が重要であることと、基線長が長いために干渉計 の光損失が鏡の姿勢の誤差(ミスアラインメント)に非常に敏感になるということである。

赤外の光を用いたレーザー干渉計の鏡に現在主に用いられるのはイオンビームスパッタによる誘電体多層膜 コーティングである。直径が数100ミクロンの細いビームを用いた鏡の性能評価は主にテストピースを用い て行われ、1枚あたりの全損失として1.5ppmという超低損失な鏡を国内で開発することに成功している(参 照:3.2節「ミラー」)[5]。しかしながら同等の鏡を20m干渉計で用いた場合、おもにビーム径にわたるコー ティングの不均一性などから、期待される性能が得られなかった。特に共振器の反射効率がリサイクリング ゲインの上限を決めており、デザインのゲインを実現するためにはほぼ設計通りの共振器性能を引き出す必



図 5.2.4: 20m プロトタイプ干渉計の光学設計

Parameter		Tabletop	20m Interferometer
Beam diameter	$2w \; [mm]$	0.82	4.4
Cavity length	$l \; [\rm{mm}]$	60	19900
Finesse	${\cal F}$	$27900{\pm}130$	$25000{\pm}60$
Reflectivity	$R \; [\mathrm{ppm}]$	$999887 {\pm} 1$	$999875 \pm 1$
Transmission	$T \; [\mathrm{ppm}]$	$97\pm2$	$95\pm2$
<b>R</b> -Efficiency	$\eta_R$	$0.09 {\pm} 0.002$	$0.045 {\pm} 0.002$
<b>T</b> -Efficiency	$\eta_T$	$0.73{\pm}0.02$	$0.58{\pm}0.02$
Total loss	$L_T$ [ppm]	$16{\mp}2$	$30{\mp}2$

表 5.2.1: テストピースと 20m 干渉計による鏡の損失測定の結果

要があった。これをうけてプロトタイプクラスから大型干渉計で用いられるビーム(直径数 mm ~ 数 10mm) に対する高性能な鏡の開発が必要になった。このために干渉計の腕を利用した 20m という長い共振器を構成 し、実際に用いる同じビームサイズで直接に損失を高精度で測定することに世界で初めて成功した。この測 定結果を鏡の製造プロセスに反映させることで、10mm サイズのビームに対して 30ppm をきる超高性能な鏡 を実現した [6, 7]。これはプロトタイプクラスの干渉計に使われている鏡としては世界最高スペックのもので ある。同時成膜されたテストピースの測定結果と併せて結果を表 5.2.1 に示す。



図 5.2.5: リサイクリングによって達成されたゲイン

これらの鏡を用いてリサイクリング光学系を組むことで 12 を越える利得が達成可能であることを実験的に 示した (図 5.2.5)。共振器の設計はフルスケールの干渉計のパラメータを採用し、フィネス 130 に選んであり、 得られたゲインは吊られた鏡のファブリー・ペローマイケルソン干渉計の世界最高のリサイクリングゲイン である。リサイクリングがかかった状態でゲイン変動が顕著であるが、これは主に共振器を構成する鏡の姿 勢の乱れによるものである。



図 5.2.6: アラインメントコントロールによるゲインの安定化

長い腕を持つ干渉計の安定制御には鏡の姿勢制御(アラインメントコントロール)が必要になってくるが、 20m プロトタイプ干渉計では波面検出法を用いたアラインメントコントロールを導入し、リサイクリングが かかった状態で干渉計の安定化に成功した。この実験では利得は少し低い設定になっているが、この状態で リサイクリングゲインなどのパラメータが顕著に向上・安定化し、干渉計は数時間以上安定にロックする事が 確かめられた。これは吊られた鏡のファブリー・ペローマイケルソン干渉計のリサイクリングにアラインメ ントコントロールを適用した世界で初めてのデモンストレーションである。これら一連の実験を通して、複 雑な結合共振器系であるリサイクリング光学系は、適切なサーボ制御回路系と光学パラメータを設計することで比較的容易に目的の状態に到達できることも示した。この実験によって増幅利得10を越えるリサイクリングが重力波検出用のレーザー干渉計で実現可能であることを示し、リサイクリング実用化のための一つの 関門をクリアした。

# 参考文献

- [1] M. Ando, K. Kawabe, K. Tsubono, Physics Letters A 237 (1997) 13.
- [2] M. Ando, K. Arai, K. Kawabe, K. Tsubono, Physics Letters A 248 (1998) 145.
- [3] M. Ando, Power recycling for an interferometric gravitational wave detector, Ph. D thesis, University of Tokyo (1998).
- [4] Masatake Ohashi, Koya Suehiro, Souichi Telada, Shuichi Sato, Masa-Katsu Fujimoto, Ryutaro Takahashi, Shinji Miyoki, Toshitaka Yamazaki, Mitsuhiro Fukushima, Akito Araya, and Osamu Miyakawa, "Current status of 20m prototype" in *Gravitational wave detection*, Universal Academy Press, pp.147-154.
- [5] Akitoshi Ueda, Noburu Uehara, Katsumi Uchisawa, Ken-ichi Ueda, Hisao Sekiguchi, Takayoshi Mitake, Kenji Nakamura, Naoya Kitajima and, Izumi Kataoka, "Ultra-high quality cavity with 1.5ppm loss at 1064 nm", Optical Review, 5, (1996) 369-372.
- [6] Shuichi Sato, Shinji Miyoki, Masatake Ohashi, Masa-Katsu Fujimoto, Toshitaka Yamazaki, Mitsuhiro Fukushma, Akitoshi Ueda, Ken-ichi Ueda, Koji Watanabe, Kenji Nakamura, Kazuyuki Etoh, Naoya Kitajima, Kazuhiko Ito and Izumi Kataoka "Loss Factors of Mirrors for a Gravitational Wave Antenna", Applied Optics, 38, (1999) 2880-2885.
- [7] 上田暁俊、植田憲一、佐藤修一、三代木伸二、大橋正健、伊藤和彦、渡邊晃司、中村憲司、北島直哉、潟岡泉、「重力 波干渉計用大口径ミラーの評価、レーザー研究、27, (1998) 116-120.

# 5.3 リサイクリング干渉計の信号取得

#### 5.3.1 はじめに

散射雑音を低減する技術であるパワー・リサイクリング[1]は、現在開発が進んでいる実証型の干渉計型 重力波検出器では「標準装備」となっている。TAMAはもとより、LIGO、VIRGOといった大型計画では図 5.3.1 のようにファブリ・ペロー・マイケルソン干渉計 (FPMI)にパワー・リサイクリングを施した光学配置 (Recycled FPMI、以後 RFPMIと略す)を採用している [2, 3, 4]。

パワーリサイクリングの詳細については本報告の5.2節「パワーリサイクリング」を参照していただき、本 節ではパワー・リサイクリングそのものについては簡単に触れるのみとする。干渉計とレーザー光源の間にリ サイクリング・ミラーと呼ばれる半透過鏡を挿入し、この鏡と干渉計の残りの部分とで光共振器(リサイクリ ング・キャビティー)を構成することにより、パワー・リサイクリングが実現される。干渉計で重力波の観測 を行う際には、干渉計の重力波への感度を最大限に高めるために、干渉計の出力ポートで両腕からの光が打 ち消し合うようにする。このダークフリンジ状態では、大部分のレーザー光はビームスプリッターからレー ザー光源の方向へむかって戻っていく。この光をリサイクリング・キャビティーに蓄積することで、干渉計の 両腕に入射される光量がリサイクリング・ゲインと呼ばれる比率で増大し、重力波に対する応答が大きくな るのである。

干渉計を最も感度の高い状態に保つには、干渉計を構成する鏡を入射レーザー光に対し最適な位置に制御 することが必要である。安定な制御を実現するためには、鏡の位置変動に対応した信号を確実に取得するこ とが重要である。RFPMIの制御信号の取得にはレーザー光源にあらかじめ位相変調を施し干渉計に入射する 手法 (フロンタル・モジュレーション [5, 6])が一般的である。

しかし、フロンタル・モジュレーションを用いた RFPMI の信号取得法には、当初いくつかの問題点があった。腕に配置されたファブリ・ペロー共振器の効果により、腕の光路長変動は大きく増幅される。これは重力波に対する感度を高めたり、レーザー周波数変動を検出するためには好都合なのであるが、逆に大きな振幅を持つこれらの信号が制御に必要な残りの信号を覆い隠すことにもなる。このように制御信号が他の信号から独立に取得できない場合には、干渉計の状態や雑音スペクトルを診断するのが困難になったり、予想外の制御経路の発生による不安定性を引き起こしかねない。



図 5.3.1: ファブリ・ペロー・マイケルソン干渉計にパワー・リサイクリングを行った場合の光学配置。

東京大学では TAMA プロジェクトの一環として RFPMI の制御に関する研究が行われた。その過程で、フ ロンタル・モジュレーションを用いながらも、その問題点を回避する独自の手法が2つ考案された。この光 学パラメータを調整する方法と高調波復調法は、3m プロトタイプ干渉計を用いて実験的に検証された。以下 では、まずフロンタル・モジュレーションの問題点を明らかにし、順に光学パラメータを調整する方法と高 調波復調法について述べる。

#### 5.3.2 RFPMI の信号取得

#### 5.3.2.1 フロンタル・モジュレーション

RFPMI で重力波を観測するときには、入射レーザー光がリサイクリング・キャビティーと両腕の光共振器 に共振し、検出ポートがダーク・フリンジになるようにする。これは、2 つのファブリ・ペロー共振器の長さ  $L_{\rm I}, L_{\rm P}$ と、マイケルソン干渉計の 2 つの光路長  $l_{\rm I}, l_{\rm P}$ の合計 4 つを制御することで実現される (図 5.3.1)。干 渉計の制御は、この4つの自由度の変動に対応した信号  $(\delta L_{\rm I}, \delta L_{\rm P}, \delta l_{\rm I}, \delta l_{\rm P})$  を取得し、これを鏡にフィード バックすることで行われる。

鏡の制御信号を取得するためにはフロンタル・モジュレーション (図 5.3.2) を利用する。フロンタル・モジュレーションとはレーザー光源の直後で位相変調をかけ、干渉計の各所から取り出した光による光電流を 復調して信号を取得する方法である。周波数 fm の位相変調をかけた時、干渉計に入射されるレーザー光に は、もともとのレーザー発振の周波数をもつキャリア光と、キャリア周波数の両側に fm の間隔で並んだサ イドバンド光の双方が含まれるようになる。このとき、両腕とビームスプリッター間の距離にあらかじめ差 (アシンメトリ)をつけておくと、キャリア成分がダーク・フリンジ条件を満たして完全に打ち消し合う場合 にも、サイドバンド光が干渉計出力に洩れ出て来るようにできる。この漏れ出てきたサイドバンド光により 重力波の検出が可能になる。

フロンタル・モジュレーションには RFPMI の制御信号取得に適したいくつかの特長がある。まず、単一の変調で済むため信号取得系が非常に簡潔になる。また、損失の大きい位相変調器を干渉計内に導入する必要が無いので、リサイクリング・ゲインを高く保つことができる。干渉計の出力ポート、反射ポート、およびリサイクリング・キャビティーから取り出した光を検出するピックオフ・ポートの光を復調した信号には $\delta L_{\rm P}, \delta L_{\rm I}, \delta l_{\rm P}, \delta l_{\rm I}$ という制御すべき4つの自由度がすべて含まれている。しかも、それらは、

$$\begin{cases}
\delta L_{-} = \delta L_{P} - \delta L_{I} \\
\delta L_{+} = \delta L_{P} + \delta L_{I} \\
\delta l_{-} = \delta l_{P} - \delta l_{I} \\
\delta l_{+} = \delta l_{P} + \delta l_{I}
\end{cases}$$
(5.3.1)

という差動変動、同相変動が分離した形で取得されるので、重力波にもっとも感度のある  $\delta L_-$  信号と周波数 雑音にもっとも感度のある  $\delta L_+$  信号が別々に取り出されて、重力波検出器としては大変都合が良いのである。



図 5.3.2: フロンタル・モジュレーションによる RFPMI の信号取得系

#### 5.3.3 フロンタル・モジュレーションの問題点

フロンタル・モジュレーションは RFPMI の制御信号取得法としては非常に有効な方法である。しかし、当初のフロンタル・モジュレーションのままでは問題点も存在する。信号分離の問題と信号の安定性の問題である。

フロンタル・モジュレーションで取得した信号には、RFPMIの4自由度の信号が含まれている。しかし、 それらの信号は分離されていない。すなわち、4自由度それぞれの信号を他の自由度の信号とは独立に取得で きない。腕共振器長の同相変動信号  $\delta L_+$  は腕共振器の位相増幅効果により大きな振幅を持つ。そのため、リ サイクリング・キャビティー長変動  $\delta l_+$  を取り出そうとする反射ポートやピックオフ・ポートは、 $\delta l_+$  よりも  $\delta L_+$  に数 100 倍高感度になってしまうのである。

信号の安定性の問題とは、光学パラメータによっては  $\delta l_+$  や  $\delta l_-$  といった信号が消失してしまう恐れのことである。リサイクリング・キャビティーにはキャリア光とサイドバンド光の両者を同時に共振させる。そ

のため、 $\delta l_+$ は干渉計の応答がキャリア光とサイドバンド光に対して異なることに立脚して取得される。たまたま、干渉計がキャリア光とサイドバンド光に対して同じ反射率(つまり同じリサイクリング・ゲイン)を持ってしまった場合、 $\delta l_+$ は取得できなくなる。もう一方の $\delta l_-$ を反射ポートで取得しようとする場合、サイドバンドの位相変動はキャリア光と干渉して検出されるので、干渉計のキャリアに対する反射率が0であると、 $\delta l_-$ は取得できなくなる。干渉計はパワー・リサイクリングによる利得を最大にするため、なるべくキャリアが干渉計内部で消費され、反射されないように設計されている。そのため $\delta l_-$ が取得できなくなる危険性を潜在的にはらんでいるのである。複数の光共振器によって構成されている RFPMI の光学パラメータを思うように調整するのは現段階では難しく、運悪く信号が消失してしまうような光学パラメータになってしまった場合、干渉計の状態の微小な変動が信号感度の大幅な変化を引き起こし、干渉計が極端に外乱に敏感になる可能性がある。最悪の場合には、信号消失の条件を横切ることで信号の符号が反転し、フィードバック制御が破綻する。

以上で述べた信号分離と信号の安定性の問題について、世界の各国で研究がなされている。

もっとも単純なやりかたは、2個所で取得した信号を足し引きして信号分離を実現する方法である。これ は、干渉計の応答が安定で、理想的な場合には有効かもしれない。しかし、干渉計のアラインメントなどに より信号の感度は変動するのが常であるため、実際には $\delta L_+$ を消去するための回路系の制御などが必要にな るであろう。それらも含めて実験的に検証する必要がある。

最初にフロンタル・モジュレーションの RFPMI の信号取得への利用を提案したのはカリフォルニア工科 大のグループであるが、彼らは信号分離の問題に対し、制御の設計で乗り切る方法を検討した [5]。この方法 は  $\delta L_+$  を大きな制御ゲインで抑圧することにより、 $\delta l_+$  を得られるようにするもので、信号取得系としては まったく変更がいらないという長所があるため、実際に LIGO 検出器の制御に採用されることになった。そ の分、制御系の設計に負担がかかるということが欠点である。



図 5.3.3: 干渉計の反射光の電場強度。横軸は光の周波数。

マサチューセツ工科大のグループは複数のキャリア光を用いる方法を開発した [7,8]。これは、周波数をず らした別のキャリア光を干渉計に入射するもので、このサブキャリア光により  $\delta l_+, \delta l_-$  信号は完全に分離さ れる。しかし、サブキャリアを発生させるために入射光学系が非常に複雑になること、高出力レーザーでそ のような光学系を実現するためには高品質の変調器群が必要になること、通常のサイドバンドとサブキャリ アを同時にモードクリーナ - で透過させるには困難が伴うことなど、大型干渉計に適用するにあたっては数 多くの問題が存在する。そのため実際には LIGO 検出器への適用は検討されていない。

TAMA では次節より述べるように、サイドバンド光に対する干渉計のカップリングを最適化する方法と反射光の光電流を変調の3倍波で復調する方法の2つが考案された。

#### 5.3.4 光学パラメータを調整する方法

東京大学で信号分離を実現する手法として、まず考案されたのが干渉計の光学パラメータを調整して、1次 サイドバンドに対する干渉計の反射率を0にする方法である[9]。そうすることで、フロンタル・モジュレー ションの信号取得系を変更することなく、反射ポートでの $\delta L_+$ 信号の寄与をなくすことができる。 以下、その原理、特長と問題点、実験的検証、TAMA300への適用について述べる。

#### 5.3.4.1 原理

この方法の原理を考えるために、RFPMI により反射される光の電場の様子を考えてみる (図 5.3.3)。キャ リア光とサイドバンド光はある複素反射率でもって干渉計により反射される (図中 Carrier および SB ± 1)。 リサイクリング・キャビティ長の変動 ( $\delta l_+$ ) があると、キャリア光とサイドバンド光は変調を受け、それぞれ の周りに (B), (C) のようなサイドバンド (オーディオ・サイドバンド)を生じる。一方、腕の共振器長が同相 変動 ( $\delta L_+$ ) すると、キャリア周波数の周辺だけに (A) のようなオーディオ・サイドバンドを生じる。これは、 リサイクリング・キャビティーにはキャリア光もサイドバンド光も共振しているのに対し、腕共振器にはキャ リア光しか共振していないからである。

干渉計で反射された光を受光素子で検出すると、サイドバンド光とオーディオ・サイドバンド (B)、キャリア光とオーディオ・サイドバンド (C) がそれぞれ周波数  $f_m$  の光電流を発生するので、これを復調することで  $\delta l_+$  に対応した信号を取得できる。しかし、同時にサイドバンド光とオーディオ・サイドバンド (A) も  $\delta L_+$  に対応した大きな信号を発生してしまう。これが、フロンタル・モジュレーションの問題であった。

しかし、もしサイドバンド光がなければ $\delta L_+$ 信号は発生せず、反射光からは $\delta l_+$ だけが抽出できる。この 条件を実現するためには、リサイクリング・ミラーの反射率と干渉計の残りの部分 (FPMI 部分) のサイドバ ンドに対する反射率が一致するようにし、サイドバンド光の干渉計へのカップリングを調整すればよい。こ れが、光学パラメータを調整する方法のエッセンスである。具体的な調整法としては、リサイクリング・ミ ラーの反射率を最適化する、リサイクリングキャビティー内に透過率可変の光学素子を入れる、アシンメト リの量を調整する、などが考えられている。

#### 5.3.4.2 特長·問題点

この手法の特長は、信号取得系に関しては当初のフロンタル・モジュレーションを全くそのまま用いるこ とができる点である。そのため、フロンタル・モジュレーションの簡潔さを全く損なうことなく、信号分離 を実現することができる。また干渉計をキャリア光ではなくサイドバンド光に対して最適化しなければなら ないとはいえ、そのことによるリサイクリング・ゲインの損失は通常それほど大きくなく、重力波感度への 影響は許容できるレベルである。

問題は、信号分離の条件を実現するために必要な調整精度が非常に厳しいことである。モデル的な大型干渉計のパラメータを用いた計算の例 [9] では、反射ポートの $\delta L_+$ への感度を $\delta l_+$ の感度の 10%に抑えるためには、リサイクリング・ミラーの反射率にして 20ppm、アシンメトリの調整に換算して 0.1mm の制度が必要であると分かった。現状では干渉計の反射率はそれほど精度良く設計できるものではないので、干渉計の光学パラメータを大きなダイナミックレンジで非常に高精度に調整できる機構が必要となる。

#### 5.3.4.3 実験的検証

光学パラメータを調整して信号分離を実現する実験は、東京大学の 3m プロトタイプ干渉計において行われた。この実験のために、3m 干渉計のリサイクリング・キャビティ内には半波長板と2枚の偏光子を組み 合わせた可変透過率ピックオフが配置された。このピックオフは半波長板をまわすことで透過率を48%から 99%まで精度良く調整することができる。

図 5.3.4 がピックオフの透過率と測定された信号分離度の関係である。透過率 87.2%の時に信号分離度としてほぼ 1、つまり反射ポートの  $\delta L_+$  への感度と  $\delta l_+$  の感度がほとんど同じになる程度まで  $\delta L_+$  信号の混入を 抑制することができた。これはピックオフ透過率を最大に設定したときにくらべ約 100 倍の改善を得たこと に相当する。

#### 5.3.4.4 TAMA300への適用

この手法を TAMA300 干渉計でリサイクリングを行う場合に適用するには、光学パラメータを調整するための機構を組み込まなければならない。粗調機構としては、リサイクリング・ミラーの反射率を FPMI のサイドバンド反射率に良く合わせておくほか、アシンメトリを変化させることなどが考えられている。最終的な調整と干渉計反射率の時間変化に追従させるための微調機構として、透過率にわざと角度依存性を持たせたピックオフ・ミラーを使うことが検討されている。



図 5.3.4: ピックオフ透過率を変化させた時の反射光における信号混入比の変化。

#### 5.3.5 高調波復調法

東京大学で考案されたもうひとつの信号取得法は高調波復調法である [10]。この方法では、反射ポートで 変調周波数の 3 倍の周波数で復調を行うことで、 $\delta l_+ \geq \delta l_-$ を取得する。高調波復調法を用いると、干渉計の 光学構成そのものに手を加えることなく  $\delta L_+$ の影響を抑えることができ、しかも得られる信号には、信号強 度が著しく小さくなったり符号が反転したりといった問題が存在しない。

以下、高調波復調法の原理、特長と問題点、実験的検証、TAMA300への適用について述べる。

#### 5.3.5.1 原理

高調波復調法は、基本的には通常のフロンタル・モジュレーションに追加の復調回路を拡張したもので、図 5.3.5 に示されるように、反射ポートに変調の3倍の周波数で復調する回路を増設することで実現される。

高調波復調法で得られる信号について考えるために、反射ポートでの電場の様子を再び考えてみる。ただし、今度は高次のサイドバンド光まで考慮する必要がある (図 5.3.6)。この場合にも、 $\delta L_+$  は、キャリア周波数の周辺だけにオーディオ・サイドバンド (A) を生じる。 $\delta l_+$  に関しては、リサイクリング・キャビティーに共振するキャリア光および奇数次のサイドバンド光の周りのみに (B), (C), (D) のようにオーディオ・サイドバンドを生じる。

変調周波数の3倍の周波数で復調を行うと、 $\delta l_+$ に対応した信号は-2次のサイドバンド光と1次サイドバンド光のオーディオ・サイドバンド(C)の干渉により生成される。一方、 $\delta L_+$ に対応した信号は、キャリア 光周りのオーディオ・サイドバンド(A)と3次のサイドバンド光による光電流から取得される。同相系の信 号とは直交した位相の復調で取得される $\delta l_-$ の場合には、キャリア周りのオーディオ・サイドバンドはない ものの、高調波復調で2次のサイドバンド光により信号が取得されるという原理は変わらない。

#### 5.3.5.2 特長·問題点

高調波復調法の第1の利点は、取得される  $\delta l_+$  への  $\delta L_+$  の混入が低減されることである。大型干渉計に 関するモデル計算では、高調波復調法を用いると  $\delta L_+$  の混入を 1/30 程度まで押さえられることが分かった。 これは主に、  $\delta L_+$  が 3 次のサイドバンド光により得られること、  $\delta l_+$  信号の相殺が起こらないこと、などに よる。

第2の利点は、取得される  $\delta l_+$  や  $\delta l_-$ の振幅が干渉計の構成に大きく依存しない、ということである。これは信号が常に干渉計に共振しないで反射される 2次サイドバンド光により発生することに起因する。高調波復調法を用いることでフロンタル・モジュレーションの信号消失の問題を回避できるのである。

これらの利点は、外部回路の拡張だけで享受できるので、フロンタル・モジュレーションの特長である簡 便さをそのまま引き継いでいる。通常のフロンタル・モジュレーション用の信号ポートもそのまま利用可能 であるので、高調波復調法を適用しても失うものは何も無い。

高調波復調法単体の利用では、反射ポートの  $\delta L_+$  に対する感度は抑制されるものの、通常は  $\delta l_+$  に対する 感度よりも小さくはならない。さらに  $\delta L_+$  に対する感度を低減するために、次にあげるような 2 つのオプショ



図 5.3.5: 高調波復調法の信号取得系 (点線内)



図 5.3.6: 干渉計の反射光の電場強度 (3次のサイドバンド光まで)。横軸は光の周波数。

ンが利用できる。

第1のオプションは3次サイドバンド光に対する干渉計の反射率を0にする方法である。前述の通り、高 調波復調法における $\delta L_+$ の寄与はキャリア光のオーディオ・サイドバンドと3次サイドバンド光の干渉から 得られる。そこで、前述の干渉計の光学パラメータを調整する方法を応用して、3次サイドバンド光に対する 反射率を0に合わせることで、 $\delta L_+$ の寄与を消すことができる。この場合には高調波で復調した時点で $\delta L_+$ の混入がもともと低減されているので、単に光学パラメータを調整する場合よりも調整精度に対する制限が 緩くなるというメリットがある。

また、別のオプションとして、主変調の3倍の周波数で弱い変調をかけることで、そもそも入射光から3次サイドバンド光を消去する方法もTAMAグループより考案された。この場合、入射光学系に位相変調器を追加する必要があるため、フロンタル・モジュレーションの簡便さは多少損なわれる。しかし、それでもなお変調透過型モードクリーナーの使用に支障が無いこと、干渉計の光学的設定を全く調整することなく完全な信号分離を得られることなどから、有望な手法であると考えられる。

高調波復調法を実現するにあたって問題となるのは、2次サイドバンドの強度である。すなわち、位相変調の変調指数が小さいと、得られる信号の散射雑音レベルが大きくなる。このような信号で制御を行うと散射 雑音や回路系の雑音が干渉計を揺らし、重力波に対する感度を損なう危険性がある。そのため、高調波復調 法の利点を十分に享受するためには、変調指数として 0.8 ないし1 といった大きな値が必要となる。

#### 5.3.5.3 実験的検証

現在、東京大学理学部の 3m プロトタイプ干渉計では、高調波復調法の検証実験を行っている。既に変調の 3 倍の周波数の局発波を用いた復調回路を付加し、高調波復調法で  $\delta l_+, \delta l_-$  を用いた干渉計の安定制御に 成功している。

信号分離度に関しては、可変透過率ピックオフを最大透過率 (99%) に設定したところ、 $\delta L_+$  の感度は  $\delta l_+$  の感度の 10 倍であった。これは、同時に測定した通常の復調信号における  $\delta L_+$  と  $\delta l_+$  との感度比 179 倍と 比べると、約 18 倍の改善が得られたことになる。さらに、 $T_{\rm PO}$  を調整して 3 次のサイドバンド光に対する反 射率を最適化することで、感度比を 0.6 倍にまで抑制することができ、高調波復調により信号分離が行えることが確認された。

さらに、透過率を変化させる過程で、通常の復調で得られた δl\_ は徐々に感度がわるくなり、ついには符 号が反転する様子が見られた (図 5.3.7)。このような信号消失・符号反転は高調波復調で得られた信号では起 こらなかった。



図 5.3.7: ピックオフ透過率と *δl* に対する感度変動の関係

#### 5.3.5.4 TAMA300への導入

TAMA300に導入するにあたっては、必要となる変調指数や、信号強度と光学配置との関係などを計算・設計する。実際に導入する際には、15MHzの復調用局発波信号を3倍の周波数にする周波数3倍器が必要とな

る。TAMA300 用周波数3倍器としては、デジタルクロック逓倍ICを用いたものがすでに試作されている。 あとはTAMAで実際に使用するための周波数3倍器を製作するほか、復調回路を準備したり、反射ポートの 信号や15MHzの局発波を分岐したりといった作業が残されている。

## 5.3.6 まとめ

現在、パワー・リサイクリングは干渉計型重力波検出器には必須の技術である。そのリサイクリング干渉 計の制御信号取得法としては、フロンタル・モジュレーションがほぼ標準となっている。しかし、単純なフ ロンタル・モジュレーションのままでは、腕共振器の位相増幅効果を享受できない  $\delta l_+, \delta l_-$  信号の取得に問 題があった。

信号取得の問題を解決するために、TAMA プロジェクト独自の手法として、光学パラメータを調整する方法と高調波復調法の2つが考案された。両手法とも東京大学の3mプロトタイプ干渉計で原理の実験的検証が行われた。いずれも大型干渉計での使用を前提とした技術であり、実際にTAMA300のリサイクリング実験への適用が検討されている。両者にはそれぞれ長所と短所があるものの、ある程度独立に適用することが可能であるため、TAMA300においてはお互いに相補的な役割を果たさせながら、最終的に最適な手法を選択することができる。

最後に、他の研究への応用について述べて締めくくりたい。これらの信号取得技術は、当然シグナル・リサ イクリングやレゾナント・サイドバンド・エキストラクションといった重力波検出の先進技術への応用が期待 できる他、干渉計実験一般での位相検出への利用も可能である。光学パラメータを調整する方法は、キャリア 光とサイドバンド光に対して異なる反射率を持つというファブリ・ペロー干渉計や非対称マイケルソン干渉 計の特性に立脚している。つまり、各次光に対し異なる応答をする一般の干渉計において、サイドバンド光 が反射してこない条件を満たせば、キャリア光の位相変動と独立にサイドバンド光の位相変動を取得できる。 高調波復調法は変調のサイドバンド同士が出す信号に着目した手法であるので、高次のサイドバンドが十分 な量存在する場合には、この方法を用いてキャリア光の位相変動を抑制した信号取得が可能となるのである。

### 参考文献

- R.W.P. Drever, in: D. G. Blair(Ed.), The Detection of Gravitational Waves, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1991, pp. 306-328.
- [2] A. Abramovici, et al., *Science* **256** 325 (1992).
- [3] The VIRGO collaboration, Final conceptual design (1992).
- [4] K. Tsubono, 300 m laser interferometer gravitational wave detector (TAMA300) in Japan, in: Proc. First E. Amaldi Conference on Gravitational Wave Experiments, June 1994, World Scientific, Singapore, 1995.
- [5] M. W. Regehr, F. J. Raab, and S. E. Whitcomb, Opt. Lett. 20, 1507 (1995).
- [6] R. Flaminio and H. Heitmann, Phys. Lett. A 214 112 (1996).
- [7] J. A. Giaime, "Studies of laser interferometer design and a vibration isolation system for interferometric graviational wave detectors," Ph.D. thesis (Massachusetts Institute of Technology, 1995)
- [8] D. Sigg, N. Mavalvala, J. Giaime, P. Fritschel, D. Shoemaker, Appl. Opt. 37 (1998) 5687.
- [9] M. Ando, K. Kawabe, and K. Tsubono, Phys. Lett. A, 237, 13 (1997).
- [10] 新井 宏二、TAMA プロジェクト内部資料「高調波復調を用いた RFPMI の信号分離」 ftp://t-munu.phys.s.u-tokyo.ac.jp/pub/arai/harmonic\_demod/harmonic\_demod\_v16.pdf
# 5.4 TAMA の熱雑音

## 5.4.1 熱雑音とは

温度 T の熱浴中に置かれた物体は、各自由度に熱エネルギー k<sub>B</sub>T/2 が分配されることによって、振動する。この振動は、精密測定の限界を課す雑音として知られており、干渉計型重力波検出器においても、

- 鏡を吊す振り子
- 干渉計を構成する鏡

の熱振動が、干渉計の光路長を変化させ、感度を制限する主要な雑音となることが予想されている。特に TAMA 計画では、鏡の内部振動の熱雑音が観測帯域での感度を大きく制限するという計算がなされ、この問 題を解決するために理論、実験両面からの研究が進められいてる。

本章では、TAMA 計画の熱雑音の計算方法について簡単にまとめ、雑音を推定し、低減するのに必要な Q 値の測定について述べる。最後に、新しい熱雑音の推定方法の開発や、より低い熱雑音を実現するための方 法などの研究について報告する。まず懸架系の熱雑音について解説し,その後鏡の内部振動による熱雑音に 関する成果を報告する。

懸架系における主な熱雑音源になる散逸は, eddy current damping と鏡を直接懸架する部分(final stage)の散逸である。

# 5.4.2 懸架系の熱雑音 - eddy current damping の熱雑音

干渉計の鏡は防振などの目的のために懸架される。このため懸架系の共鳴周波数付近では地面振動により 鏡の位置は大きく揺らぐ。干渉計を安定に動作させるためにはこの振動を抑制しなければならない。TAMA の懸架系は二重振り子であり、強力な永久磁石による eddy current によりこの揺らぎを小さくする。この dampingの利点は、受動的であるので構造や取り扱いが簡単であるということである。しかし散逸、つまり 熱雑音源を懸架系に導入するという問題がある。

このため二重振り子の中段マスのみに eddy current damping をかける。中間マス自体の揺動は重力波検出 という目標 ( $10^{-19}m/\sqrt{Hz}@100Hz$ ) と比較して非常に大きく ( $10^{-15}m/\sqrt{Hz}@100Hz$ ) なる。しかしこの振動 は地面振動同様に防振されて鏡には伝達されない。

以上のような方法で eddy current damping による熱雑音の影響を低減できる。しかし重力波検出が可能に なる程度まで低減することができるかということは熱雑音以外の要素も考慮して設計された防振系において実際に計算しないとわからない。TAMA の防振系の eddy current damping による2重振り子の運動方程式と揺 動散逸定理から熱雑音を計算した結果が図 5.4.1 である。pendulum mode やワイヤーの violin mode のよう



図 5.4.1: eddy current damping による TAMA の熱雑音

に光路長を直接変化させる自由度だけでなく、ビームと鏡の中心のずれ<sup>1</sup>に比例した光路長変化をおこす鏡の pitch、yaw 回転や、地球表面が曲率を持つということによって光路長変化をひきおこす縦振動も計算した。

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>ここではそのずれを 1mm と仮定した。

いずれの自由度も観測帯域においては問題にならないことがわかった。eddy current damping 以外の散逸に よる熱雑音は散逸自体がこれより小さいことや同様に防振されることによって問題にならないと考えられる。 唯一の例外は鏡を懸架している部分の散逸による熱雑音であるがこれは次の 5.4.3 節で述べる。

## 5.4.3 懸架系の熱雑音 - final stage の熱雑音

## Q値への要請

振り子の最終段 (final stage) の散逸は eddy current damping に比べるとかなり小さい。しかし先ほどと違い、防振されず直接鏡に働くのでその影響は決して小さくない。そこでこの散逸による熱雑音も計算した。先ほどの議論からわかるように中段マスの運動は充分防振されているのであたかも中段マスが固定されているかのように計算することができる。つまり単純な調和振動子の熱雑音の計算に帰着される。TAMAの懸架系について計算した結果は図 5.4.2 の通り。ここでは仮に Q 値は violin mode 以外は  $10^5$  とした。violin mode の Q 値は pendulum mode の半分であるという関係が知られているので  $5 \times 10^4$  とした。final stage の散逸は周波数に依存しない structure damping であると仮定し、pendulum と violin mode の熱雑音はモード展開(各振動モードの熱雑音の重ね合わせ)を利用して計算した。



図 5.4.2: final stage の散逸による TAMA の熱雑音

の寄与が大部分を占めることがわかる。つまり Q への制限は pendulum と violin mode が最も厳しくなる。 TAMA の目標感度と比較して各自由度の Q 値の下限を計算した。結果を表 5.4.3 にまとめた。d は鏡の中 心とビームのずれをあらわしている。

mode	lower limit of Q
Pitch	$4\times 10^4 (d/0.5\mathrm{mm})^2$
Yaw	$4 \times 10^3 (d/1 \mathrm{mm})^2$
Vertical	$2 \times 10^{-2}$
Pendulum	$5 \times 10^5$

表 5.4.2: 各自由度の Q 値の下限

最も考慮すべき pendulum や violin mode の Q 値は既に測定されている。その結果は次の 5.4.3 節を参照の こと。

Q 値の測定

TAMA の最終段の振り子では、熱雑音の計算から要求される Q 値  $5 \times 10^5$  に対し、現在、 $3 \times 10^5$  以上の Q 値が達成されていると考えられている。振り子の Q 値は主に、

1. ワイヤーの内部損失 (structure, thermoelastic)

2. ワイヤー固定部で起きる摩擦などの付加的な損失

3. 残留ガスによる損失

で決まるが、残留ガスによる損失は TAMA の真空度では問題にならない。本節では、まずワイヤーの材質、 形状によって原理的に制限される Q 値を示し、次に実際の振り子で主要な損失となる付加的な損失とその対 策について述べる。

ファイバーの Q 値の測定 ワイヤーの損失  $\phi_w(\omega)$  によって、振り子の損失  $\phi_p(\omega)$  は、次のように表せる。

$$\phi_p(\omega) = \phi_w(\omega) \frac{n\sqrt{TEI}}{2mql}$$
(5.4.2)

ここで、*n*:ワイヤーの本数、*T*:各ワイヤーの張力、*E*:ヤング率、*I*:ワイヤーの断面二次モーメント、*m*:質量、*g*: 重力定数、*l*:ワイヤーの長さである。TAMA で用いるタングステンワイヤーの場合、 $\phi_p(\omega) = 7.4 \times 10^{-4} \phi_w(\omega)$ 。 従って、ワイヤーの内部損失の Q 値が、 $3.7 \times 10^2$  以上であれば、TAMA の振り子の Q 値は原理的には達成 可能になる。

ワイヤー内部の損失は、structure damping (材料の内部損失が、周波数によらずほぼ一定の値をとる) の他に、熱擬弾性 thermoelastic damping で制限されることがある。熱擬弾性による損失  $\phi_t$  は、次の式 で表される。

$$\phi_t(\omega) = \Delta \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \tag{5.4.3}$$

但し、 $\Delta = E\alpha^2 T/c$ 、 $f_0 = (2\pi\tau)^{-1} = 2.16D/d^2$ 。E:ヤング率、 $\alpha$ :線膨張係数、T:温度、C:比熱、 $\rho$ :密度、 $c = C\rho$ :単位体積あたりの比熱、d:ワイヤーの直径、 $\kappa$ :熱伝導率、 $D = \kappa/c$ :熱拡散係数である。この式から、常温では、線膨張係数の小さい熔融石英に比べて、金属 (タングステン、真鍮) やサファイアは、 $\Delta$  で 2 桁程大きい値を取り、熱擬弾性の影響が大きいことが分かる (図 5.4.3)。

以上をふまえて、次のようにしてワイヤーの Q 値の測定を行った。短いワイヤー (~10cm) の上端をアルミ の板に挟んで固定し、アルミの板につけてある PZT を振ってワイヤーの共振を励起する。ワイヤーの変位 x を LED と PD を組み合わせたセンサーで測りながら励起を切り、変位の減衰  $x = Ae^{-\sigma t}$  (t:時間) を測定し、  $Q = \pi f_0 / \sigma (f_0 : 共振周波数)$  に従って Q 値を求めた。

結果を図 5.4.3 に示す。タングステンワイヤーでは、要求値の 10 倍程度の Q が得られているが、その値 は、熱擬弾性から計算されるものよりもかなり小さい。周波数依存性もあまりみられないことから、これは、 structure damping で決まっていると考えられる。サファイアの Q 値は、常温では熱擬弾性で決まっており、 金属とあまり変わらない値をとるが、低温では線膨張率が下がるために、Q 値が良くなる (10<sup>6</sup> 程度) という 結果が得られている。これについては 5.5.4 節を参照のこと。熔融石英は、TAMA で用いられる SUPRASIL P-10 の他に P-30、東芝の T1030 を測定したが、あまり違いは見られず、3 ~ 5 × 10<sup>5</sup> 程度だった。また、熔 融石英は、棒状のものを熱してファイバーを作成し、Q 値を測定しているので、材質の作成方法などで問題 があることも考えられる。

### violin mode の Q 値の測定

実際の振り子では、ワイヤーとマスの接点での摩擦による損失によって、ワイヤーの内部損失から予想される値よりもQ値が低くなることがわかっている。この影響を抑えるために、鏡に stand off と呼ばれる小さな棒を接着する。stand off は、振り子のQ値を上げる一方で鏡のQ値を下げるので、その材質、形状は鏡のQ値も考慮して決定された (5.4.6節参照)。TAMA で用いている stand off は、直径 2mm、長さ 4mm のAl の真中にワイヤーの位置を決めるための小さな溝を彫ったものになっている。

振り子の Q を測定するにはかなり長い時間を要するので ( $f_0 \sim 1$ Hz であるので、Q 値  $10^5$ の振り子の振幅が半分になるまで変位を測定するには、6 時間かかる)、代わりに violin mode の Q 値がよく測定される。 violin mode の Q 値  $Q_v$  と振り子の Q 値  $Q_p$  の間には、 $Q_p = 2 \times Q_v$  の関係がある。ここでは、violin mode の Q 値の測定について述べる。

測定に用いたワイヤーは直径 60µm のタングステンワイヤー (TAMA では 50µm だが、治具を使わない と扱いにくい) 長さはほぼ 25cm、2-loops single pendulum で、鏡は TAMA と同サイズの SUPRASIL P-30 を用いている。ワイヤーの上部固定端に貼った PZT で共振を励起し、LED と PD を組み合わせて減衰を測 定した。

stand off をつけた場合と、つけない場合について、真空度を変えながら Q 値を測定した結果を図 5.4.4 に 示す。stand off をつけた場合に測定された Q 値は、つけない場合  $(2 \times 10^4)$  の 10 倍程度の  $1.5 \times 10^5$  であった。これより pendulum の Q 値は  $3 \times 10^5$  と推定される。但し実際の懸架系とワイヤーの径が違うので若干 Q が違う可能性がある。





without stand off

図 5.4.3: ワイヤーの Q の測定値と熱擬弾性の式 (5.4.3) から計算される Q 値 (実線:タングステン、 点線:サファイア、破線:熔融石英)。熱擬弾性の 2 本の理論線は、ワイヤーの太さをそれぞれ 150 µm 250 µm としたときのもの。 図 5.4.4: stand off をつけた場合と、つけない 場 合の violin mode の Q 値。

# 5.4.4 鏡の熱雑音 - 材質と形状への要求

鏡の熱雑音の熱雑音は鏡の弾性振動モードの熱雑音の重ねあわせとして計算する(モード展開)。鏡の熱雑 音の観測帯域におけるスペクトルは、以下のようになる。

$$G_{\text{mirror}}(f) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4k_B T}{m_n \omega_n^2 Q_n} \frac{1}{\omega}$$
(5.4.4)

 $m_n, \omega_n, Q_n$ は鏡の弾性振動のモードの換算質量、共鳴角周波数、Q 値を表す。 $m_n, \omega_n$ は鏡の形状と材質から計算することができるが、Q 値に関しては測定以外に値を知る方法はない。Q 値の測定に関しては 5.4.5 節, 5.4.6 節で述べる。ここでは全てのモードの Q 値は等しいとし、 $m_n, \omega_n$ を計算して、熱雑音の大きさを見積もる。そして Q 値に関する要請や、熱雑音を低減するために材質や形状に関して議論する。

 $m_n, \omega_n$ の計算は原理的には弾性体の運動方程式を解くことによって求めることができる。しかし解析的に 解くのはかなり難しい。そこで Hutchinson によって提唱された方法 [1] を実行するプログラムを開発した。 これは半解析的に弾性円柱体の振動モードを計算する手法である。共鳴周波数の計算値と測定値は誤差 1%以 内で一致したので極めて信頼性の高い方法といえる。

このプログラムを用いて熱雑音に関して最適化された形状を求めた。このとき回折損失から鏡の半径はビームの半径の3倍以上の大きさでなければならないという条件に注意しなければならない。その結果厚さと直径の比は(材質によらず)0.3~1.0であれば熱雑音に関して最適化されることがわかった。TAMAを含む全ての計画の鏡はこの条件を満たしている。

この最適化された鏡の熱雑音を計算してみた。式 (5.4.4) を実際に計算するときには cut-off 周波数以下の モードのみを考慮するが、この cut-off 周波数と 100Hz における熱雑音のパワースペクトルの関係が図 5.4.5 に示す。TAMA の front mirror と end mirror の熱雑音を計算した。Hutchinson のプログラムが開発される 前は、鏡の熱雑音を推定するときには基本モードの寄与のみを考慮するという近似が行なわれていた。しかし 図 5.4.5 によると高次のモードの寄与は無視できる大きさでなく、振幅は基本モードのみの推定の 3 倍になっ ていることがわかる。これは Q の下限が従来の推定の 10 倍大きくなることを意味している。

式(5.4.4)と図5.4.5から最適化された鏡の熱雑音の大きさは以下のようになる。



図 5.4.5: cut-off 周波数と熱雑音の関係

$$\sqrt{G_{\text{mirror}}(f)} = 1.0 \times 10^{-19} \text{m} / \sqrt{\text{Hz}} \left(\frac{1 \text{cm}}{w}\right)^{1/2} \left(\frac{7.24 \times 10^{10} \text{Pa}}{E}\right)^{1/2} \left(\frac{10^6}{Q}\right)^{1/2} \left(\frac{100 \text{Hz}}{f}\right)^{1/2} \tag{5.4.5}$$

w, E はビームの半径とヤング率である。式 (5.4.5) から材質として E, Q が高いものが望ましいということ がわかる。現在材質は熔融石英が主流である。これより熱雑音が小さい材質の候補としてサファイアがある。 サファイアは E, Q ともに熔融石英より大きく熱雑音の振幅は 1/7 倍になる。冷却するとさらに小さくなるこ とが期待される。詳細は 5.5.4 節を参照のこと。

最後に TAMA と他の計画の Q の下限を比較してみよう。TAMA の基線長は LIGO,VIRGO に比べて短い ので w は小さくなる。これは式 (5.4.5) より TAMA の Q の下限が高くなることを意味している (3 倍程度)。さらに TAMA の鏡は LIGO,VIRGO に比べて小さい。鏡の熱雑音はこのことによりあまり変化しないが、懸 架系の熱雑音は大きくなり、その分鏡の Q 値への要求が厳しくなる (2 倍程度)。さらに TAMA は変位雑音の 目標値 (5×10<sup>-20</sup> m/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ) は他の計画 (8×10<sup>-19</sup> m/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ) より厳しい。このため Q の下限はさらに 2~3 倍 厳しくなる。結局すべてを考慮すると他の計画より Q への要求は 1 桁以上大きくなり、Q の下限は 2×10<sup>7</sup> となる。これは以下で述べられる Q の測定からもわかるように厳しい値である。但し今までの議論からもわ かるように鏡の熱雑音自体の振幅は Q が同じならば他の計画の 2 倍弱であり、しかもこれは基線長の短さに 起因するものである。

## 5.4.5 鏡の熱雑音 - 鏡の intrinsic Q

これまで見てきたように TAMA300 の最終感度を決める鏡の熱雑音の推定のためには、鏡の Q 値の測定が 不可欠である。鏡の材料自体の散逸 (intrinsic Q) を知る事が出来れば、懸架した鏡の Q 値にも上限が課せられ、その鏡を使った検出器の感度にも上限が課せられることになる。

一般に、重力波検出器の鏡として用いられるような低損失材料のQ値を測定する際には、試料の支持系の 散逸が無視できなくなり、測られるQは支持系の散逸で決定される。検出器の鏡の新たな材料を探索し、Q 値を下げない懸架系を積極的に開発するためにも、高いQ値の測定法を確立することは重要である。

ここでは、材料の不動点を支持する、intrinsic Q を直接測定するための測定系の開発とその実験結果についてまとめる。

## 実験装置

鏡のような円柱弾性体の振動モードを 5.4.4 節で紹介した Hutchinson の方法で解析すると、伸縮モード (n=0) や首振りモード (n=1) 以外では、その中心が完全な節になることがわかる。すなわち、これらのモードにおいて、中心における支持による散逸は小さい。

そこで、鏡形状のサンプルの上下の中心をルビーの小球 (直径 2mm) で支持し、サンプルの各モードの Q 値を Ring Down 法により測定する実験を行った。サンプルは真空中 (0.01 Torr 以下) におかれ、静電アクチュ

エータで共振が励起された後、Michelson 干渉計により振動変位の減衰が読み出される。多数ある内部共振の 同定は計算と、実験的手法により行っている。周波数については計算と実験の対応がほぼ完全についている。 結果

TAMA300 で用いられる鏡と同じ形状の、単結晶シリコン、溶融石英 (P-30)、アルミニウム (5056) につい て測定を行った。シリコンではねじれのモード (n=0) で室温下では例のない Q 値  $1.0 \times 10^8$  を記録した。溶 融石英は  $1.2 \times 10^6$ 、アルミニウムは  $1.9 \times 10^5$  程度の値が最高であり、これまでのワイヤー懸架や共振型ア ンテナ形状における測定結果から大きく改善されることはなかった。図 5.4.6, 5.4.7 にシリコンと溶融石英の 測定結果を示す。



図 5.4.6: シリコン

図 5.4.7: 溶融石英

### 考察

シリコンについての測定から、装置が intrinsic Q を直接測定するのに有効な方法であることが示された。 一方、溶融石英やアルミニウムについては intrinsic Q がこれまでの測定で得られている Q 値程度であること も分かった。

シリコンのQ値のモード依存性は興味深い。ねじれと思われるいくつかのモードが特に高いQ値を示している。現在はそのモード依存性の解析を行い、内部散逸の機構について調べている。また、モードの同定のための計算や実験を行っている。さらに、透過鏡として有力な候補であり、将来計画では冷却鏡としても有望視されているサファイア(5.5.4節参照)の測定準備を進めている。

# 5.4.6 鏡の熱雑音 - 懸架した鏡の Q 値測定

鏡の全てのモードのQが等しいとすると、TAMAの目標感度を達成するためには、Q値は $2 \times 10^7$ である ことが必要である。それに対して、実際にTAMAサイズ (直径 10cm 高さ 6cm)の熔融石英の鏡で測定され ている値は、最高で、 $(1.1 \pm 0.1) \times 10^6$ であり、制御のために鏡に接着される磁石によって更にQが下がる ことが分かっている。Q値の測定に用いられた鏡の基材はSUPRASIL P-30 (信越石英)で、TAMAで用い られる SUPRASIL P-10 とは脈理の性質が異なるが、鏡の熱雑音がTAMAの感度を制限する深刻な問題と なることは間違いない。本節では、実際にTAMAで使用される状態での鏡のQ値に着目し、鏡につけられ る磁石や stand off (5.4.3節参照)がQ値に与える影響についてまとめる。

Q 値の測定

TAMA の鏡には、ワイヤーの Q 値を上げるための 4 つの stand off と、制御のための磁石が 4 つ接着される (図 5.4.8)。これらの影響を調べるために、ワイヤーで吊っただけの状態と、stand off をつけた場合、磁石 をつけた場合について鏡の Q 値を測定した。

Q値は、100kHz以下(測定器の限界)にある、鏡の11個の軸対称モード全てについて測定した。鏡は、残 留ガスによる損失を防ぐために、10<sup>-4</sup>torr程度の真空槽内に置かれ、2重振り子で懸架されている。Q値の 測定は、鏡に共振周波数で力を加える事によって共振を励起し、励起を切った後の鏡面振動の振幅の減衰を 単純な Michelson 干渉計で測定する方法で行われた。力を加える方法は、

- 鏡に磁石を接着して近傍に置いたコイルに電流を流す方法
- 鏡のごく近く (1mm 以下) に置いた極板に 100V 程度の電圧をかける静電的な方法

## があり、主に後者を用いた。



図 5.4.8: TAMA の鏡の懸架系

結果

ワイヤーで吊っただけの状態でも、Q値はモードによって異なり、 $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$ の値をとる。stand off をつけた場合は、ワイヤーで吊っているだけの状態に比べて Q値はそれほど悪くならない。しかし、それ まで使っていた磁石 (直径 2mm, 長さ 10mm の Nd 磁石) は、著しく Q値を下げることが分かった (表 5.4.3, magnets( $\phi$ 2,l10))。そこで、より小さな磁石を 5 種類用意して、各々について Q値の測定を繰り返した。そ の結果、直径の大きな磁石が Q を下げる傾向があることが分かった。また、測定した Q値とコイルとのカッ プリングを考慮して、TAMA300 で用いる磁石 (直径 1mm 長さ 5mm の Nd 磁石)を選定した。選定した磁石 を接着した場合、従来の磁石に比べて Q値は高くなり (表 5.4.3, magnets( $\phi$ 1,l5))、磁石を変えることによっ て、観測帯域での鏡の熱雑音を 1/3 に低減したことになる。

freq[kHz]	27.8	35.3	43.5	50.3	51.3	66.0	68.1	83.7	84.3	89.5	99.4
2-loops $Q[10^5]$	3.1	7.8	4.6	6.2	8.9	7.4	5.1	7.1	0.68	9.4	1.4
stand off $Q[10^5]$	5.3	5.8	3.3	4.8	4.0	1.2				4.6	
$mag(\phi 2l10) Q[10^5]$	0.67	2.8	0.15	0.15	0.075	0.063		0.15	0.69	0.46	1.1
$mag(\phi 1l5) Q[10^5]$	0.77	7.0	0.64	0.86	4.3	2.4	1.9	3.4	1.6	2.0	2.8

表 5.4.3: SUPRASIL P-30 で測定された Q 値

# 5.5 熱雑音に関する R&D

本節ではまず揺動散逸定理の検証実験について述べ、その後に新しい熱雑音の推定及び計算方法について 紹介する。最後に将来に向けての熱雑音低減の研究について述べる。

# 5.5.1 板バネの熱雑音の広帯域測定

はじめに

熱平衡系における熱揺らぎのパワースペクトル $S_x(\omega)$ は揺動散逸定理により

$$S_x(\omega) = \frac{4k_{\rm B}T}{\omega^2} \Re[Y(\omega)]$$
(5.5.6)







図 5.5.11: 熱雑音スペクトル (1 Pa)(実線:熱雑 音スペクトル、点:予想スペクトル)

と表される [2] 。ここで  $Y(\omega)$  は系のアドミッタンスである。

$$Y(\omega) = i\omega \frac{X(\omega)}{F(\omega)}$$
(5.5.7)  
 $X(\omega) : 系の変位 F(\omega) : 系に加わる外力$ 

一般に、調和振動子の運動方程式はフーリエ領域で

$$-m\omega^2 X(\omega) + k[1 + i\phi(\omega)]X(\omega) = F(\omega)$$
(5.5.8)

と書ける。ここで  $k[1 + i\phi(\omega)]$  は複素バネ定数で、 $k\phi(\omega)$  は系の損失を表す項である。

我々の実験では、機械共振子の熱揺らぎを直接測定した。また、この機械共振子のアドミッタンスを測定し、揺動散逸定理を用いて熱揺らぎのスペクトルを予想した。直接測定した熱揺らぎのスペクトルとアドミッタンスからの予想スペクトルとを比較することにより、揺動散逸定理を実験的に検証した。

実験と結果

実験には 12 mm×3.3 mm×0.075 mm のリン青銅でできた板バネ型機械共振子を用いた (図 5.5.9)。この 板バネの表面をよく磨いて鏡と同様に使えるようにして、マイケルソン型レーザー干渉計の片方のエンドミ ラーの代わりに用いた。もう片方のエンドミラーを固定して、変位換算熱雑音を測定した。また、機械共振子 に力を加え、メカニカルアドミッタンスを測定した。圧力の影響を調べるため、これらの測定を 0.1 Pa と 1 Pa の状態で行った。直接測定した熱雑音と、アドミッタンスから予想した熱揺らぎのスペクトルを図 5.5.10、



図 5.5.10: 熱雑音スペクトル (0.1 Pa)(実線: 熱雑 音スペクトル、点:予想スペクトル)



図 5.5.12: 系の loss function (黒丸: 0.1 Pa、白丸: 1 Pa)

5.5.11 に示す。どちらの圧力でも、測定したスペクトルと予想したスペクトルは 30 Hz から 500 Hz の範囲 でよく一致していることがわかる。

### 考察

直接測定した熱雑音のスペクトルと揺動散逸定理から予想したスペクトルがよく一致したことから、揺動 散逸定理がこの機械共振子の系でよく成り立っていることがわかる。

また、式 (5.5.8) によって、系の loss function  $\phi(\omega)$  は

$$\phi(\omega) = \frac{\omega}{k} \Re[1/Y(\omega)] \tag{5.5.9}$$

と表される。測定した機械共振子のアドミッタンスから、この関係を用いて系の loss function を求めると、 その周波数依存性は 図 5.5.12 のようになる。loss function を一次関数  $\phi(f) = af + b$  でフィッティングす ると、0.1 Pa では  $\phi(f) = 2.6 \times 10^{-6}f + 6.5 \times 10^{-4}$ 、1 Pa では  $\phi(f) = 2.1 \times 10^{-6}f + 5.9 \times 10^{-4}$ とな る。周波数 f に依存しない項 b は物質に固有の損失と考えられる。粘性抵抗を表す項 a は、圧力に依存して いないので、気体による粘性抵抗ではない。

この実験によって、重力波の観測が期待されている数百 Hz の帯域での揺動散逸定理の妥当性が実験的に確かめられた。

## 5.5.2 反共振を利用した新しい熱雑音推定法の提案とその検証実験

今まで述べてきた観測帯域での鏡の熱雑音の推定はモード展開を使って行われているが、この方法には以 下のような問題がある。

- 損失が一様に分布していないと正しい解を与えない。
- 損失の周波数依存性はモデル (structure damping model) に依存している。

実際、鏡では、接着された磁石などの付加的な損失がQ値を制限している(5.4.6節)ことから、TAMAの鏡では、損失が一様に分布しているという仮定は成り立っていない。また、モードによってQ値が1桁程度変化することから、損失の周波数依存性に対する仮定(structure damping model:損失は周波数によらず一定)にも疑問の余地がある。

このような問題を踏まえ、揺動散逸定理を用いて熱雑音を推定する方法を考案した。この方法では、1.モードによるQ値のばらつきなどを考慮する必要が無い、2.反共振周波数を目的の周波数に合わせることができれば、損失の周波数依存性も考えなくてよい、という利点を持つ。本節では、この方法の原理を説明し、その検証実験についてまとめる。

揺動散逸定理を用いた熱雑音の推定方法

揺動散逸定理によると、変位雑音のスペクトル密度  $x^2(\omega)$  は機械系に加えた力 f から変位 x への伝達関数  $H(\omega)$  の虚部を用いて、次の式のように表される。

$$x^{2}(\omega) = -\frac{4k_{B}T}{\omega} \operatorname{Im}\left[H(\omega)\right]$$
(5.5.10)

この式から、実際に機械系の伝達関数を直接測定することが出来れば、熱雑音を推定出来ることが分かる。しかし、共振から離れた周波数では、伝達関数には虚部のQ値倍以上の実部が存在し、測定系の僅かな位相遅れなどによって、実部が混入するため、虚部の測定は困難である。そこで、反共振では実部が消失して虚部のみが残ることに着目した。

反共振

反共振では、なぜ実部が消失するか説明する。簡単のため、2-mode oscillator を考える。系全体の伝達関数は、

$$H(\omega) = \frac{\hat{x}}{\tilde{f}} = \sum_{i=1,2} \frac{1}{m_i \{(\omega_i^2 - \omega^2) + i\phi_i(\omega)\omega_i^2\}}$$

となる。ひとつの共振に着目すると、 $\omega \ll \omega_i$ では  $H_i(\omega) \simeq 1/m_i \omega_i^2$ 、 $\omega \gg \omega_i$ では  $H_i(\omega) \simeq -1/m_i \omega^2$ となっている。

全体の伝達関数は、各々の伝達関数の足し合わせになっているので、 $\omega_1 \ll \omega_2$ とすると、二つの共振の間で、 $1/m_1\omega^2 - 1/m_2\omega_2^2 = 0$ となる周波数  $\omega_{anti} = \omega_2\sqrt{m_1/m_2}$ が存在し、伝達関数の実部が、0 になるのである。

伝達関数の虚部に関しては、その符号は常に負の値をとる。従って、2つのモードの寄与を足し合わせて も、打ち消し合うようなことは起こらない。ゆえに、実部が0になる反共振周波数では、虚部のみが残るの である。 検証実験

以上の推定方法を確認するため、板ばねと質量を組み合わせた簡単な機械振動子を作成して反共振周波数 での伝達関数の虚部の測定を行った。測定系と振動子を図 5.5.13 に示す。



図 5.5.13: 伝達関数の測定系



図 5.5.14: 反共振で測定された伝達関数の虚部: が実部 が虚部の測定値の絶対値。破線が従来の 推定法から予想される虚部の絶対値。

結果

測定の結果、27Hz 付近の反共振周波数では、図 5.5.14 のように実部が小さくなって虚部を良く分離して 測定出来ることを確認した。また、測定された虚部の値は、2 つの共振で測定された Q 値 ~ 8 × 10<sup>2</sup> とモー ド展開から推定される値 (図 5.5.14 破線) と良く一致しており、この推定方法の有用性が確認された。 現在、この方法を干渉計に用いる鏡に応用した研究を進めている。

# 5.5.3 非一様な散逸による熱雑音

懸架系の pendulum と violin mode や鏡の熱雑音を推定するときにはモード展開という方法が使われている。これは懸架系や鏡の熱雑音は振動モードの熱雑音の重ね合わせと仮定して推定する方法である。この方法による共鳴以外の周波数の推定値が、実際の値とずれる要因として2つのことが考えられる。1つは散逸の周波数依存性の仮定が不適切ということ、もう1つは散逸が非一様に分布していることである。ここでは後者が原因によるずれを考える。

モード間の結合と相関

モード展開は熱雑音は各モードの重ね合わせとして計算する方法であるが、各モードの熱雑音は無相関であるという仮定のもとに成立する。この前提は散逸が非一様に分布している場合には保証されない。

散逸がないときには系の運動方程式は、モード展開によって多数の調和振動子の運動方程式に分解できる。 散逸項まで含めてモード展開を行なうと、各調和振動子が散逸をもつと同時に(散逸が一様でない場合には) モード間の結合が生じる。この結合によって各モードの熱雑音は無相関でなくなる。熱雑音を推定するとき にはこの結合およびそれによる各モードの相関を考慮しなければならない。

熱雑音の上限と下限

モード間結合はモードの周波数が近いときや、散逸が狭い領域に集中しているときに大きくなる。しかし その絶対値の大きさには上限がある。これは相関に上限があることに対応している。結合が最大のときに相 関も最大に、つまり熱雑音の振幅は各モードの振幅の和もしくは差の絶対値となる。

以上のことからモード展開という手法は正しい熱雑音の推定を与えないかもしれないが、熱雑音の推定の 上限と下限を与えることはできる。あるモードの寄与が卓越している場合には、上限も下限も結合を考慮し ない推定値とそれほどかわらない。しかし複数のモードからの寄与がほぼ同じ場合には、上限も下限も結合 を考慮しない値から大きくずれる可能性がある。その実例は5.4.2節でとりあげた中段マスのみを damping した2重振り子である。この振り子の2つのモードのQ値はかなり低くそれぞれのモードの熱雑音は大きい。 しかしモード間の相関は観測帯域で大きい負の値をとる。それぞれのモードの寄与の絶対値はほぼ等しいの で結局相殺されて、熱雑音はかなり小さい値になってしまう。 以上を参考にして懸架系と鏡の熱雑音の上限と下限を求めてみよう。 懸架系の熱雑音の上限と下限

懸架系の熱雑音の相関を考慮しない推定値からのずれは、大きくないと考えられる。それは観測帯域においては pendulum もしくは 1st violin mode の寄与によって、熱雑音の大きさは決まっているからである。唯一の例外はこの2つのモードの寄与が等しくなる周波数であるが、この周波数付近だけで下限が著しく小さくなるだけなので、観測帯域全体で積分すると大きな影響は表れない。

鏡の熱雑音の上限と下限

鏡の熱雑音は 5.4.4 節からわかるようにある 1 つのモードからの寄与が、卓越していないので相関を考慮し ない計算値から大きくずれる可能性がある。上限の値を計算すると振幅はモード展開の 10 倍という大きな値 になった。またモード間の結合の符号を調節することによって、かなり小さい下限値を得ることができると 考えられる。

ビームが当る面の中心に散逸が集中していると熱雑音は、上限の値に近くなる。しかし現実的にはこのよう なことは考えにくい。鏡の coating 面に散逸が集中している場合というのが考えられる最悪の場合であろう。

一方ビームの当るところから離れているところに散逸が集中している場合には、下限値に近付く。5.4.6節にもあるように磁石を接着することによって鏡のQ値が低減するが、観測帯域の熱雑音はそれほど大きくないという可能性もある。

鏡の場合下限値を計算すると非常に小さい値になることが予想される。よって 5.4.5 節のように鏡がもつ intrinsic loss (これは一様に分布していると考えられる。)を測定し、この値を用いてモード展開から熱雑音 を計算した方がより参考になる下限値を得ることができる。

#### direct approach

熱雑音の推定のずれの限界については以上の議論のように計算できるが、散逸分布が与えられたときに実際に結合まで考慮したモード展開によって推定を行なうことは繁雑である。最近、モード展開によらず直接 impedance を計算して、熱雑音を推定するという方法が開発されている (direct approach)。いくつかの計算 例のうち、ここでは coating 面に散逸が集中した鏡の熱雑音について紹介する。これは先ほどの議論にもある ように、相関を考慮しない推定より大きい値になると予想されるものである。計算の結果、熱雑音の振幅は モード展開による推定の 2 ~ 3 倍になった。これは先ほどの結果と矛盾しない値である。実際にはこちらの 値が上限になると考えられる。

## 検証実験

以上述べてきたように、散逸が非一様に分布している系の熱雑音も計算できるようになってきた。現在、この計算の検証として、一部にのみ eddy current damping をかけた板バネの熱雑音を測定し、計算と比較する 実験を進めている。

## 5.5.4 Cryogenic mirror

### 鏡の冷却

鏡を極低温に冷却するための研究が世界に先駆けて日本で行われている。これは TAMA 計画とは独立に 97 年度から東京大学宇宙線研究所と高エネルギー加速器研究機構低温センターとの共同開発研究として始まり、 現在 (99 年 7 月) も進行中である。目的は重力波干渉計の熱雑音を下げることにある。現状は feasibility study の段階だが、98 年度にこの低温化の技術の使用を特徴とした LCGT 計画 [3] が東大宇宙線研究所の将来計画 として提案されている。LCGT 計画は地面振動の静かな神岡鉱山内に設置され、3km の腕の長さを持つ干渉 計である。大きさは LIGO [4] や VIRGO [5] と同じ規模だが、低温鏡を導入し、熱雑音を下げ、それらより 一桁上の感度を目指している。

熱雑音の振幅は以下のように表すことができる [6]。

$$\langle x^2 \rangle \propto \frac{T}{Q}$$
 (5.5.11)

ここで T は温度、Q は機械的な Q 値である。TAMA を含め、干渉計において今まで熱雑音を低減するため に行われてきたのは Q の大きな素材を用いて鏡や振り子を作ることであったが、低温鏡では、まず T を 20 K以下まで下げ、さらに極低温で Q 値の大きくなる素材を用いることで相乗的に熱雑音を低減する。

極低温に検出器を冷却して熱雑音を下げ、感度向上を図るというやり方は重力波検出の世界では決して真 新しいやり方ではなく、共振型検出器では確立された方法だった。しかし干渉計で低温技術を導入するとい う試みはこれまでなされなかった。主な理由は、

1. レーザー光を吸収して発熱する鏡を冷却する方法がない。

2. 鏡を冷却するとクライオポンプの効果で鏡表面に汚れが付着してしまう。

等の困難な課題が予想されたからである。が、これまでの研究でこれら二つの課題について非常に前向き な成果が出てきている。それらをまとめて紹介する。 低温鏡懸架システム

干渉計の鏡はレーザー光を吸収して必ず発熱する。低温を維持するには熱を鏡から逃がす必要がある。その ために使える手段は鏡を懸架するファイバーの熱伝導しかない。そこで鏡とファイバーに極低温で熱伝導が よく機械的なQ値の高い素材を用いることを考え、単結晶サファイアの鏡を同じく単結晶サファイアのファ イバーを用いて懸架する方式(低温鏡懸架システム)を提案し、冷却可能性、鏡のQ値測定、ファイバーのQ 値測定を行っている。



図 5.5.15: 鏡冷却実験の結果。入力した熱に対する鏡の平衡温度を示す。実験では 4.2 K 熱アンカーからサ ファイアシリンダーとファイバーの接触点までの距離が 10 cm になっている。よって、TAMA で用いられて いるように二段振り子状に鏡を吊るし、懸架装置の上部を 4.2 K に冷却した場合、流れる熱量は熱アンカーと 鏡の接触点の間の距離に反比例するので本実験の約 1/5 になる。

冷却可能性を調べる実験は直径 10 cm 長さ 6 cm のサファイアシリンダー (TAMA のミラーサイズ) に直径 250 ミクロンのサファイアファイバー [7] 2 本を巻き付け、ファイバーの両端を 4.2 K に冷却される銅のテー ブルに固定し、熱アンカーをとる。シリンダー表面にヒーターを取り付け、レーザー光の吸収による発熱を シミュレートし、発熱に対するシリンダーの温度変化を温度計によりモニターする。結果、期待通り熱はサ ファイアファイバーを流れ、シリンダーは入熱に対して平衡温度に達して安定することが確認された。得ら れた結果から実際に 20 K 以下に干渉計の鏡を維持するのも決して無理ではないと考えている。図 5.5.15 に ヒーターで加えた熱と測定した平衡温度の関係を示す。詳しくは参考文献 [8] を参照されたい。

さらにサファイアシリンダー [9] の Q 値の温度依存性を測定した。実際に干渉計で使われる鏡と同じよう に直径 10 cm 長さ 6 cm のシリンダーを 2 本の直径 250 ミクロンのサファイアファイバーで吊して行った。干 渉計の熱雑音に大きく寄与する軸対象モードの低周波側から二つまでに関して測定した。結果は 4.2 K での  $2.5 \times 10^8$  を最高値として、二つのモードとも 15 K 以下で  $10^8$  以上を記録した。図 5.5.16 に結果を示す。詳 しくは参考文献 [10] を参照されたい。

現在進めている実験がサファイアファイバーのQ値測定である。この研究の目的は低温鏡懸架システムの振り子のQ値を評価することにある。しかし、低周波の大きなQ値測定は長時間の測定時間を要し実際的ではない。そこで、方端のみをクランプで固定したファイバーのbendingの基本モードのQ値を測定し、得られたQ値にdissipation dilution theorem を適用して、振り子の時のQ値を推算する方法を採っている。現在得られている最高の値は、6Kでの共振周波数199 HzのbendingのQ値で $1.03 \times 10^7$ である。この結果を使って、Q値測定を行ったサファイアシリンダーを2本のサファイアファイバーで吊した場合の1 Hzの振り子のQ値を求めると $1.17 \times 10^9$ になり、大幅な振り子の熱雑音の改善が期待できる。

極低温に冷却された面にガス分子等が付着すると凍り付いて堆積していく。干渉計の鏡は高い quality が必要 なため、冷却することでこのように表面が汚染されていくのは致命的だと考えられていた。そこで、まずは クライオスタットの中にハイフィネスキャビティー(約 40000)を置き、ヘリウム温度まで冷却してフィネス の変化を測定し、汚染の影響を調べた。キャビティーは側面に空気穴のあいた円筒の両端にオプティカルコ ンタクトで鏡が取り付けられている。一ヶ月間の測定の結果、有意なフィネスの低下は観測されず、干渉計



図 5.5.16: シリンダーのQ 値の温度依存性。

全体を冷やすという方法を採る限り、低温鏡の汚染の問題はないと考えられる。しかし干渉計全体を冷やす のは非効率であるため現在、低温鏡の周囲のみ冷却し、腕ダクトは室温のままにする方法を考えている。こ の場合、室温ダクト内の残留ガスにより低温鏡表面が汚染される可能性があり、今後この影響を調べる実験 を予定している。

# 今後の展望

これまでの結果から、今までの室温の干渉計に比べ一桁以上の熱雑音の改善が低温鏡懸架システムで期待で きる。懸念された汚染の問題も解決に向かっている。以上の結果はさらに低温鏡に関する研究を進めること を強く支持している。加えて上に挙げた以外にもサファイアの光学的要素(散乱と吸収)に関する研究も現在 進められている。また極低温下でのキャビティーの制御に関する研究も99年度後半にKEKにて始まる予定 である。これらの要素開発研究は、柏キャンパス移転後の宇宙線研究所に作られる6mの低温重力波干渉計 プロトタイプ(はじめは片腕)として組み上げられ、最終的にはLCGTへつながるであろう。

# 参考文献

- [1] J.R.Hutchinson, J.Appl.Mech. 47 (1980) 901.
- [2] H. B. Callen and R. F. Greene, Phys. Rev. 86 (1952) 702.
- [3] K. Kuroda et al., Proceedings in XXXIVth Rencontres de Moriond, Gravitational Waves and Experimental Gravity Les Arcs, Savoie, France, January 23-30, (1999)
- [4] M. W. Coles et al., Proceedings of the international conference on gravitational waves: sources and detectors ed. I. Ciufolini and F. Fidecaro, World Scientific, Singapore, (1997) 93.
- [5] B. Caron et al., Proceedings of the international conference on gravitational waves: sources and detectors ed.
   I. Ciufolini and F. Fidecaro, World Scientific, Singapore, (1997) 73.
- [6] P. R. Saulson, Phys. Rev. D 42 (1990) 2437.
- [7] Saphikon Inc.(米) の製品を使用した。
- [8] T. Uchiyama et al., Phys. Lett. A 242 (1998) 211.
- [9] CRYSTAL SYSTEMS Inc.(米)の Hemlite grade の製品を使用した。
- [10] T. Uchiyama et al., ICRR-report-444-99-2.