

JAERI-Tech

JP0550090

2005-003



SPring-8 原研アンジュレータービームライン
BL11XU の分光結晶の振動の現状と対策

2005年3月

桐山 幸治・塩飽 秀啓・望月 哲朗*
菖蒲 敬久・戸澤 一清

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2005

編集兼発行 日本原子力研究所

SPring-8 原研アンジュレータービームライン
BL11XU の分光結晶の振動の現状と対策

日本原子力研究所関西研究所放射光科学研究センター
桐山 幸治^{*1}・塩飽 秀啓・望月 哲朗*・菖蒲 敬久^{*1}・戸澤 一清^{*2}

(2005年1月7日受理)

大型放射光施設 SPring-8 に設置した原研アンジュレータービームライン BL11XU において、液体窒素冷却分光器（以下、分光器）に見られる振動及び出射光の時間的強度変化を抑制するために、分光結晶の振動対策を行った。出射光の強度は、数分周期の不規則な振動や秒毎のばらつきを持って変化していたことから、分光結晶の 1 Hz 以下（1 秒以上の周期）と 1 Hz 以上（1 秒以下の周期）の振動対策が必要だと考えた。振動計による振動測定の結果、1~10Hz, 30Hz, 50Hz の振動成分が特に顕著だった。分光結晶のプラグ角や分光結晶を冷却する液体窒素循環冷却装置及び真空系機器の運転条件を系統的に変化させて調べたところ、これらの振動源は液体窒素の流れによるものと分光器外部の機器からの伝播によるものということがわかった。さらに、循環させている液体窒素の流量や内圧の不規則な変動があり、温度は温度制御による一定周期の変動があった。これらが数分周期の出射光の強度変化の原因である可能性も考えられる。そこで、それぞれの原因に対策を行った結果、1~10Hz, 30Hz, 50Hz の振動は除去、もしくは減少した。また、液体窒素の内圧の変動も抑えることができた。その結果、出射光の時間的強度変化は対策前に 4.47%（標準偏差 : 0.0113）であったが、対策後は 0.85%（標準偏差 : 0.0011）と減少し、出射光強度の安定性が改善された。今回 BL11XU で行った振動対策は、液体窒素冷却分光器を持つ SPring-8 の他のビームラインに対しても十分有効だろう。

関西研究所：〒679-5148 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1

* 財団法人 高輝度光科学研究センター

^{*1} 業務協力員：スプリングエイトサービス株式会社

^{*2} 業務協力員：石川島播磨重工業株式会社

Stabilizing Methods for Mechanical Vibrations
on Cryogenically Cooled Monochromator on BL11XU at SPring-8

Koji KIRIYAMA^{*1}, Hideaki SHIWAKU, Tetsuro MOCHIZUKI*,
Takahisa SHOBU^{*1} and Kazukiyo TOZAWA^{*2},

Synchrotron Radiation Research Center
Kansai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Mikazuki-cho, Sayou-gun, Hyogo-ken

(Received January 7, 2005)

Multi-stabilizing methods for vibrations on the cryogenically cooled monochromator have been developed on BL11XU at SPring-8. Intensity fluctuation of x-rays was observed without the multi-stabilizing methods. Vibration frequencies measured directly on crystals were mainly 1-10 Hz, 30 Hz, and 50 Hz. The results suggested that sources of the vibrations were liquid nitrogen flow and vacuum pumps equipped with the beam line. We took countermeasures against the vibrations from liquid nitrogen tubes, and set parameters (temperature, pressure and flow-rate of liquid nitrogen) of the cryogenic cooling system for 1-10Hz vibration. Vibration absorber was set not to propagate the vibrations from the vacuum pumps and their fans for 30 and 50Hz vibrations. These methods successfully removed the mechanical vibrations. As a result, the width of the intensity fluctuation with time was decreased from 4.47% to 0.85% (standard deviation: 0.0113 to 0.0011). The developed methods in the present work on BL11XU are expected to apply to the similar monochromator system at the other beam-lines.

Keywords : SPring-8, BL11XU, Monochromator, Vibrations, Liquid Nitrogen

* Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

^{*1} Cooperative Staff from SPring-8 Service Co.,Ltd

^{*2} Cooperative Staff from Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co.,Ltd

目次

1.	はじめに -----	1
2.	振動測定 -----	2
2. 1	方法 -----	2
2. 1. 1	出射光の時間的強度変化測定 -----	2
2. 1. 2	分光結晶の振動測定 -----	2
2. 1. 3	液体窒素の温度・圧力・内圧測定 -----	7
2. 2	結果 -----	8
2. 2. 1	出射光の時間的強度変化 -----	8
2. 2. 2	分光結晶の振動 -----	10
2. 2. 3	バイヨネットジョイント部の振動 -----	14
2. 2. 4	液体窒素の温度・内圧・流量測定 -----	16
2. 3	考察 -----	18
3.	振動対策 -----	20
3. 1	方法 -----	20
3. 1. 1	分光結晶の1~10Hz 振動対策 -----	20
3. 1. 2	分光結晶の30Hz 振動対策 -----	23
3. 1. 3	分光結晶の50Hz 振動対策 -----	23
3. 1. 4	液体窒素の温度・圧力・内圧の変動対策 -----	26
3. 2	結果 -----	27
3. 2. 1	分光結晶の1~10Hz 振動対策 -----	27
3. 2. 2	分光結晶の30Hz 振動対策 -----	29
3. 2. 3	分光結晶の50Hz 振動対策 -----	30
3. 2. 4	液体窒素の温度・内圧・流量の変動対策 -----	30
3. 3	まとめ -----	33
4.	結論 -----	35
	謝辞 -----	35
	参考文献 -----	36

Contents

1.	Introduction -----	1
2.	Measurements of Vibrations -----	2
2. 1	Methods -----	2
2. 1. 1	Measurements of X-rays Intensity Fluctuation -----	2
2. 1. 2	Measurements of Vibrations on Crystals -----	2
2. 1. 3	Measurements of Temperatures, Pressures and Flow Rate of Liquid Nitrogen -----	7
2. 2	Results -----	8
2. 2. 1	X-rays Intensity Fluctuation -----	8
2. 2. 2	Vibrations on Crystals -----	10
2. 2. 3	Vibrations on Bayonet Joint -----	14
2. 2. 4	Vibrations on Temperatures, Pressures and Flow Rate of Liquid Nitrogen -----	16
2. 3	Discussion -----	18
3.	Restraint of the Vibrations -----	20
3. 1	Methods -----	20
3. 1. 1	For Vibration Frequencies of 1-10 Hz -----	20
3. 1. 2	For Vibration Frequency of 30 Hz -----	23
3. 1. 3	For Vibration Frequency of 50 Hz -----	23
3. 1. 4	For Vibrations on Temperatures, Pressures and Flow Rate of Liquid Nitrogen -----	26
3. 2	Results -----	27
3. 2. 1	Vibration Frequencies of 1-10 Hz -----	27
3. 2. 2	Vibration Frequency of 30 Hz -----	29
3. 2. 3	Vibration Frequency of 50 Hz -----	30
3. 2. 4	Vibrations on Temperatures, Pressures and Flow Rate of Liquid Nitrogen -----	30
3. 3	Summary -----	33
4.	Conclusions -----	35
	Acknowledgements -----	35
	References -----	36

1. はじめに

大型放射光施設 SPring-8 に設置した原研アンジュレータービームライン BL11XU では、分光結晶をダイヤモンド結晶からシリコン結晶に交換し、結晶冷却方式を間接水冷却方式から間接液体窒素冷却方式に変更した[1, 2]。その結果、改良前に比べて出射光特性が向上しており、BL11XU で行われる実験において質の高いデータの取得が期待される。

その一方で、SPring-8 の液体窒素冷却分光器を導入したビームラインでは、出射光の時間的強度変化が報告されている[3, 4]。BL11XU においても、ダイヤモンド結晶を使用していたときには見られなかった出射光の時間的強度変化がいくつかの実験条件で観測された。出射光の強度には、数分周期の不規則な変動や秒毎のばらつきをもつ変動があった。時折、瞬間に強度が変動する場合もあった。これらの変化の原因是、平行配置された分光結晶の平行度がくずれることで出射光の強度と位置を変化させるためだと推測される。そして、その平行度がくずれる原因是、分光器結晶が振動するためだと考えられる。すなわち、出射光の強度を安定化させるためには、出射光強度の変動の特徴より考えると、分光結晶の 1Hz 以下（1 秒以上の周期）と 1Hz 以上（1 秒以下の周期）の振動源を解明し、その対策を行う必要がある。

そこで、最初に出射光の時間的強度変化の状態と傾向を調べるとともに、分光結晶の振動及び結晶を冷却するための液体窒素の圧力や流量、温度の変動の有無、種類、振幅（変動）の大きさなどを詳細に調べた。振動対策後に、再び振動測定を行い、対策の効果を確認した。また、分光器からの出射光の時間的強度変化を測定し、対策の有効性を確認した。

2. 振動測定

2. 1 方法

2. 1. 1 出射光の時間的強度変化測定

分光後の出射光の強度は、PIN フォトダイオード検出器[5]を用いて測定した。検出器は BL11XU 実験ハッチ 1 定盤上に設置した(図 1)。光源から分光器までの距離は約 39m、分光器から検出器までの距離は約 16m である。検出器の出力信号は電圧としてオシロスコープで取り込み、データロガーを用いて取得した。測定条件として、分光結晶のプラグ角 $\theta = 7.89^\circ$ 、アンジュレーター磁石列間距離(以下、アンジュレーターギャップ) 20.1mm に固定した。測定周期 1 秒で、900 秒間測定した。液体窒素冷却装置と出射光の時間的強度変化の関係を調べるために、液体窒素循環冷却装置のポンプ電源周波数を 32、34、36、38、40、41、43、44、50Hz で変化させた。

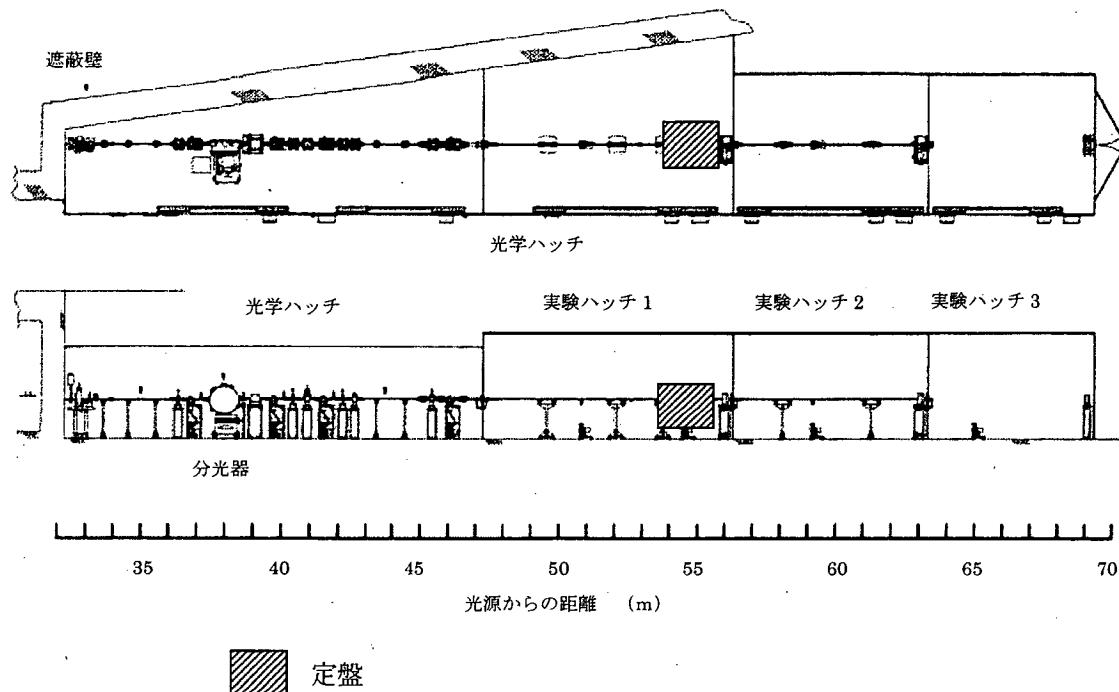


図 1 BL11XU ハッチ

2. 1. 2 分光結晶の振動測定

分光結晶の振動の変位を、リオン製振動分析計(VA-11)とリオン製圧電式加速度ピックアップ(PV-87 及び PV-55; PV-55 は液体窒素配管の振動測定時に使用した。)を用いて測定した。圧電式加速度ピックアップは、分光器の第一結晶と第二結晶ホルダーのステージにネジによって固定した(図 2)。測定された波形データは PC で FFT(高速フーリエ変換)を行い、1~125Hz における振動情報を得た。

振動源を把握するための予備実験として測定した振動の測定結果を図3に示す。ビームライン運転中（プラグ角7.89°、アンジュレーターギャップ20.1mm、液体窒素ポンプ電源周波数30Hz）の振動状態と、放射光を照射せずポンプ等のビームラインの運転に必要な機器の電源を全て切ったビームライン停止中の振動状態を比較してみると、後者の方が、分光結晶に放射光を照射している状態より振動が小さかった。すなわち、振動の発生は分光器の使用条件と液体窒素循環冷却装置の運転、排気ポンプの真空系の運転に影響を受けている可能性が高いと考えた。

そこで、プラグ角、アンジュレーターギャップ、液体窒素循環冷却装置のポンプ電源周波数を系統的に変化させて振動状態を測定した。ポンプ電源周波数と液体窒素流量には図4に示す関係があり、ポンプ電源周波数を変化させることは液体窒素流量を変化させることを意味している。また、BL11XUの分光器は光軸に対して直行して水平方向に結晶ステージを移動させて、ステージ上に並べて配置されているSi(111)とSi(311)を切り替えることができる[1]。これによつて、分光器の結晶ステージの位置が横方向に50mm変化することから、Si(111)時だけでなくSi(311)時でも上記の条件を変えて振動測定を行つた。これらの測定条件を表1に示す。さらに、MBS閉、プラグ角7.89°の条件で、液体窒素循環冷却装置ポンプ、コンプトンシールド板冷却水、ダイレクトビームキャッチャー冷却水、分光器に直付けされたターボ分子ポンプのファンをそれぞれ停止させた状態で、第一・第二結晶の振動を測定した（測定時間5秒）。これらの条件を表2に示す。

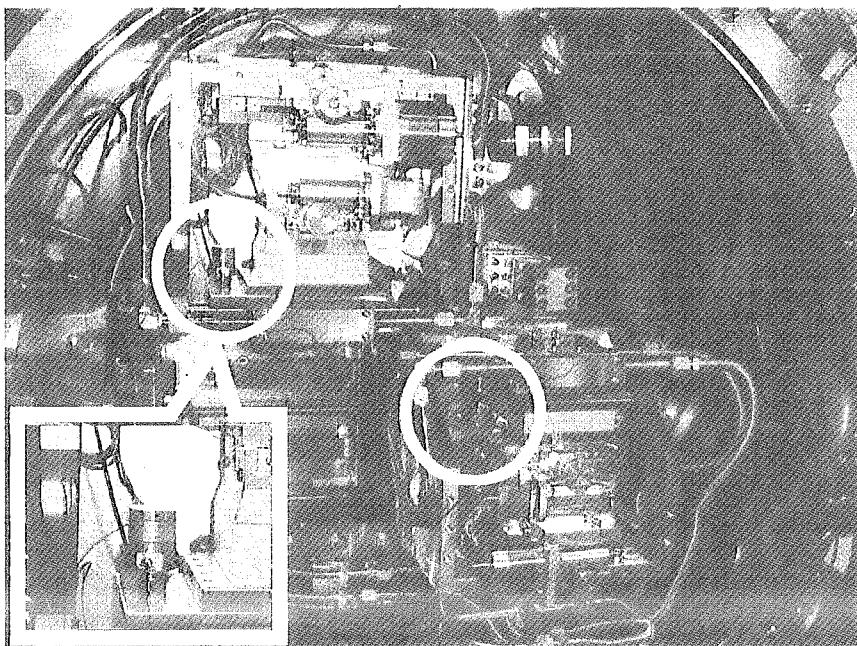


図2 分光器へのピックアップの設置
白丸中心にピックアップ。写真左下はピックアップの拡大図

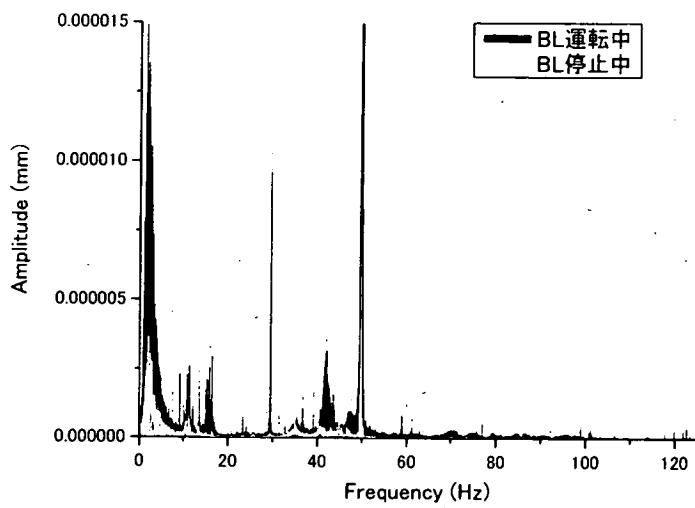


図3 結晶ステージの振動

黒線：ビームライン運転中（プラグ角 7.89° 、アンジュレーターギャップ 20.1mm、液体窒素ポンプ電源周波数 30Hz）、灰線：ビームライン停止中（真空ポンプ等のビームライン運転に必要な機器の電源が切れている）の振動状態の比較

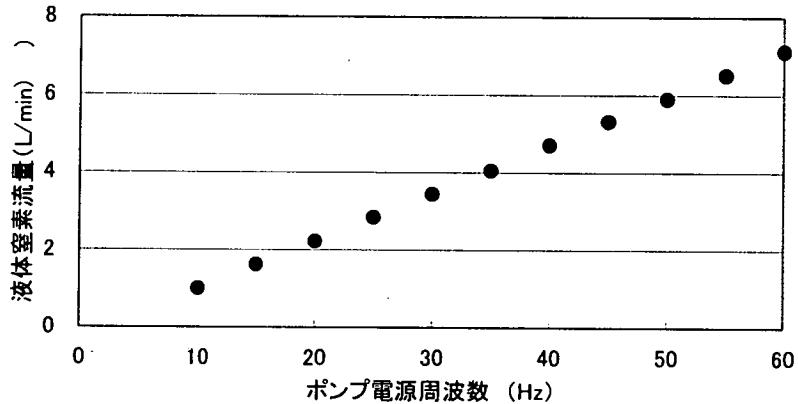


図4 BL11XU 液体窒素循環装置のポンプ電源周波数と液体窒素流量の関係

表 1 分光結晶の振動測定条件 1

結晶	プラグ角(°)	アンジュレータ ギャップ(mm)	ポンプ電源 周波数(Hz)	結晶	結晶	プラグ角(°)	アンジュレータ ギャップ(mm)	ポンプ電源 周波数(Hz)	結晶
SK111)	7.89	201	30	第一	SK311)	15.449	201	30	第一
				第二					第二
			35	第一				35	第一
				第二					第二
			40	第一				38	第一
				第二					第二
			41	第一				39	第一
				第二					第二
			42	第一				40	第一
				第二					第二
			43	第一				45	第一
				第二					第二
			44	第一				50	第一
				第二					第二
			45	第一					
				第二					
			50	第一					
				第二					
SK111)	3	201	40	第一	SK311)	3	201	40	第一
				第二					第二
	5			第一		5			第一
				第二					第二
	10			第一		10			第一
				第二					第二
	15			第一		15			第一
				第二					第二
	20			第一		20			第一
				第二					第二
	25			第一		25			第一
				第二					第二
	27			第一		27			第一
				第二					第二
SK111)	7.89	10	40	第一	SK311)	15.449	10	40	第一
				第二					第二
	15			第一			15		第一
				第二					第二
	201			第一			201		第一
				第二					第二
	25			第一			25		第一
				第二					第二
	30			第一			30		第一
				第二					第二
	40			第一			40		第一
				第二					第二
	50			第一			50		第一
				第二					第二

表 2 分光結晶の振動測定条件 2

結晶	θ	アンジュレーターギャップ	条件
Si (111)	7.89	-	MBS 閉 第一 結晶
			第二 結晶
		窒素ポンプ停止	第一 結晶
			第二 結晶
		コンプトン水停止	第一 結晶
			第二 結晶
		ダイレクトビーム キャッチャー水停 止	第一 結晶
			第二 結晶
		ターボ分子ポンプ ファン 停止	第一 結晶
			第二 結晶

これらの条件では放射光を照射していない (MBS 閉)。

2. 1. 3 液体窒素の温度・圧力・内圧測定

出射光強度の数分周期の変動や突如として起こる変動は、今回設置した振動計では測定することが困難であるため、他の方法を用いて振動源の調査を行なわなければならない。そこで、振動計による分光結晶の振動測定だけでなく、循環する液体窒素の温度、流量、内圧の変動も装置に付属しているセンサーによって測定した。その信号を、YOKOGAWA 製 DR130 レコーダーで読み取り、PC にてデータロガーソフトによって取得した。測定周期は 2 秒、測定時間は 15 分で測定を行った。測定項目を表 3 に、測定場所を図 5 に示す。

表 3 液体窒素循環冷却装置のパラメーター

表示	測定内容	測定場所
TC1	温度	熱交換器温度 1
TC2	温度	熱交換器温度 2
TC3	温度	熱交換器温度 3
PS1	圧力	熱交換器 3 台の下流
PS2	圧力	アキュムレーター
Flow Rate	流量	熱交換器 3 台の下流

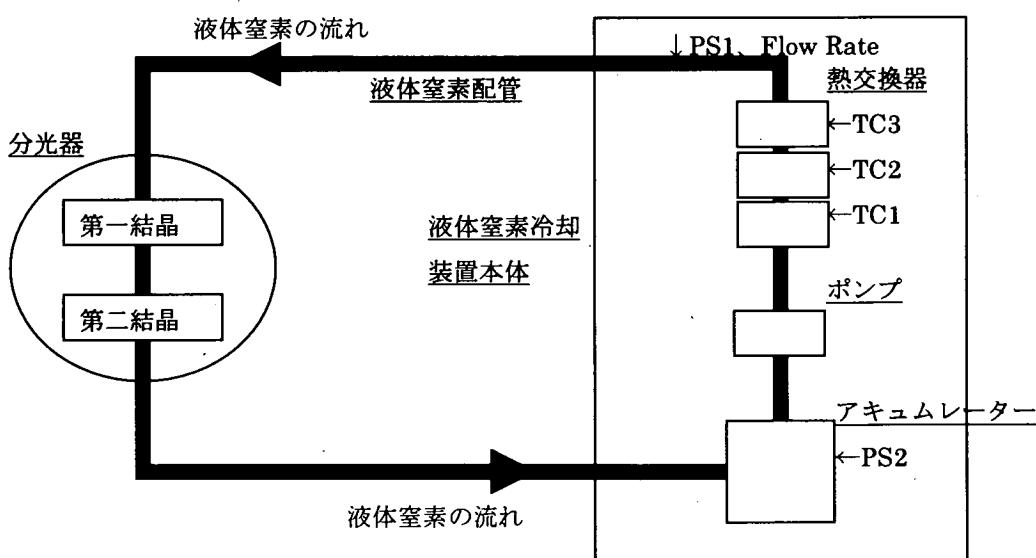


図 5 液体窒素の循環経路概略図

矢印 (←) は表 3 にあるパラメーターを測定している箇所を示す

2. 2 結果

2. 2. 1 出射光の時間的強度変化

ポンプ電源周波数を 32Hz～50Hz まで変えて出射光強度を測定した結果を表 4、図 6 に示す。振幅を比較してみると、ポンプ電源周波数と強度変化には規則的な関係はなく、変化が一番小さかったのは 41Hz の時で、振幅は 4.47% であった。逆に変化が一番大きかったのは 50Hz の時で 26.72% であった。5～10 分程度で不規則に強度が変化しており、瞬間的に強度が変化することも観測された。また、秒毎に強度のばらつきがあった（図 6 41Hz 拡大）

表 4 ポンプ電源周波数を 32Hz～50Hz まで変化させた時の
PIN フォトダイオード検出器の出力の変動の割合

ポンプ電源周波数 (Hz)	PIN フォトダイオード検出器強度(a. u.)			振れ割合(%)	
	平均値	標準偏差	最大	最小	
32	1.007	0.0262	1.046	0.942	11.01
34	1.007	0.0169	1.044	0.961	8.61
36	0.991	0.0227	1.041	0.930	11.94
38	1.006	0.0275	1.043	0.935	11.62
40	0.993	0.0141	1.018	0.961	5.95
41	0.997	0.0113	1.010	0.967	4.47
43	1.029	0.0175	1.056	0.993	6.29
44	0.962	0.0308	1.002	0.882	13.59
50	1.085	0.0760	1.162	0.917	26.72

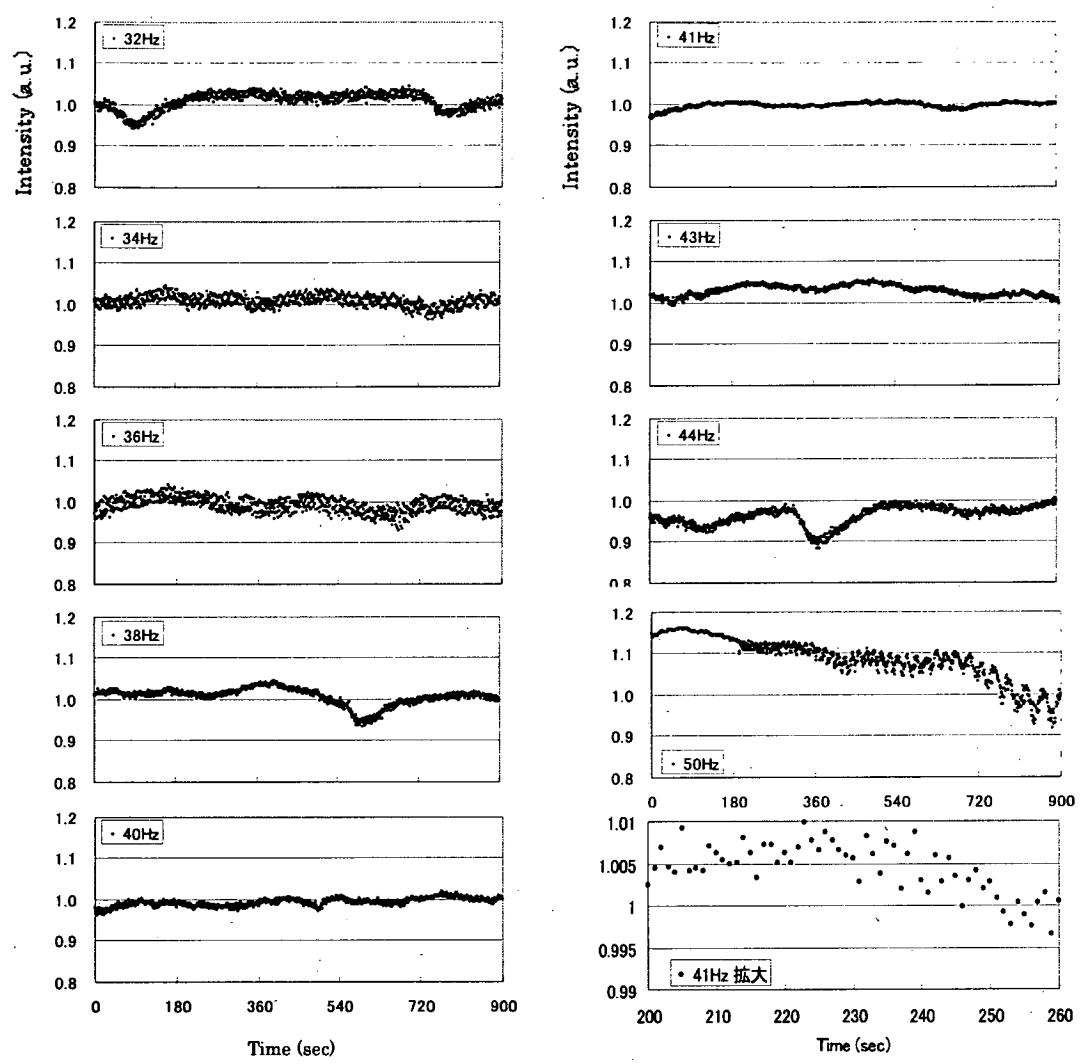


図 6 ポンプ電源周波数を 32Hz～50Hz まで変化させた時の
PIN フォトダイオード検出器の出力の変動

2. 2. 2 分光結晶の振動

ポンプ電源周波数変更時（アンジュレーターギャップ 20.1mm、プラグ角 7.89° ）、アンジュレーターギャップ変更時（ポンプ電源周波数 40Hz、プラグ角 7.89° ）、プラグ角 θ 変更時（ポンプ電源周波数 40Hz、アンジュレーターギャップ 20.1mm）、それぞれの条件での振動計データを FFT 変換した結果、1.2~2.2 Hz、2.4~2.6 Hz、4.4~5.0 Hz、6.6~7.5 Hz、9 Hz、10.4~10.9 Hz、12~13 Hz、15.9~17.5 Hz、29.0~30 Hz、40~45Hz、49.5~50.0Hz の振動成分が目立って観測された。 $4.69 \times 10^{-11} \text{Hz}$ のピークもあったが、ピックアップの性能として周波数特性は 1 Hz 以上であることから、振動計の測定によるく 1 Hz の振動はノイズ成分であると考えられる。

それぞれの分類した周波数の振幅を図 7、表 5、6 に示す。これらの結果から次のことがわかった：(1) Si(111) と Si(311) では振動の大きさが異なるが、それぞれの結晶で条件を変えた時の相対的变化の傾向はよく似ている。(2) 相対的に 10~20Hz、40~45Hz の振動は小さいが、1~10Hz の振動は比較的大きく、条件によっては程度の差が顕著に示される。(3) ポンプ電源周波数が 40~45Hz 以上になると、1~10Hz の振幅が特に大きくなる。(4) アンジュレーターギャップを小さくしていくと、1~10Hz の振幅が大きくなる。(5) プラグ角 θ と振幅に相関性は少ない。(6) 30Hz 付近、50Hz 付近の振動は、比較的大きな振幅をもち、分光器条件や液体室素循環冷却装置の運転条件を変えてても、振幅はほとんど変化しない。(7) ほとんどの場合において、第一結晶のほうが第二結晶に比べて 30Hz、50Hz の振幅が大きく、第二結晶のほうが第一結晶に比べて 1~10Hz の振幅が大きい。

表 5 Si(111)を使用した時の振動成分と振幅 (単位: mm)

結晶	振動	ポンプ電源周波数 (Hz)				
		30	35	40	45	50
第一結晶	1~10Hz	1.6E-05	9.0E-06	1.9E-05	2.9E-05	6.7E-04
	10~20Hz	2.9E-06	3.2E-06	5.5E-06	1.3E-05	3.2E-04
	30Hz	1.0E-05	9.7E-06	1.2E-05	1.2E-05	1.2E-05
	40~45Hz	4.1E-06	5.3E-06	4.7E-06	5.6E-06	5.0E-06
	50Hz	1.1E-04	9.0E-05	1.1E-04	8.7E-05	4.6E-05
第二結晶	1~10Hz	1.9E-05	6.0E-06	3.0E-04	1.1E-03	7.5E-04
	10~20Hz	3.7E-06	3.8E-06	3.3E-06	2.0E-04	6.7E-04
	30Hz	4.6E-06	4.5E-06	5.5E-06	8.7E-06	2.3E-04
	40~45Hz	8.1E-07	1.3E-06	9.3E-07	1.4E-05	9.9E-06
	50Hz	5.8E-05	5.8E-05	6.9E-05	5.7E-05	4.6E-05
アンジュレーターギャップ (mm)						
		10	15	20	25	30
第一結晶	1~10Hz	6.8E-05	5.3E-05	1.7E-05	1.2E-05	1.2E-05
	10~20Hz	1.0E-05	8.1E-06	6.9E-06	5.2E-06	9.0E-06
	30Hz	6.4E-06	1.1E-05	1.1E-05	9.4E-06	1.2E-05
	40~45Hz	5.9E-06	5.5E-06	4.7E-06	5.2E-06	6.0E-06
	50Hz	9.8E-05	7.7E-05	1.2E-04	9.4E-05	8.9E-05
第二結晶	1~10Hz	7.9E-04	5.7E-04	6.6E-04	3.8E-04	4.9E-04
	10~20Hz	3.3E-06	3.4E-06	3.5E-06	3.4E-06	2.9E-06
	30Hz	3.0E-06	4.8E-06	4.7E-06	4.6E-06	5.0E-06
	40~45Hz	1.6E-06	1.2E-06	1.3E-06	9.6E-07	1.5E-06
	50Hz	5.6E-05	5.1E-05	7.0E-05	5.5E-05	5.6E-05
プラグ角 (°)						
		3	5	10	15	20
第一結晶	1~10Hz	2.1E-05	1.7E-05	3.1E-05	2.7E-05	1.6E-05
	10~20Hz	4.3E-06	6.8E-06	5.5E-06	4.2E-06	5.7E-05
	30Hz	1.2E-05	1.4E-05	3.2E-05	1.4E-05	1.4E-05
	40~45Hz	2.5E-06	3.1E-06	5.8E-06	6.3E-06	6.7E-06
	50Hz	8.1E-05	9.2E-05	8.5E-05	6.9E-05	6.8E-05
第二結晶	1~10Hz	1.7E-04	2.1E-04	6.3E-04	8.4E-04	2.6E-04
	10~20Hz	5.6E-06	4.3E-06	3.2E-06	4.1E-06	5.6E-06
	30Hz	4.0E-06	6.0E-06	1.2E-05	7.5E-06	8.3E-06
	40~45Hz	1.1E-06	8.7E-07	1.3E-06	1.5E-06	1.5E-06
	50Hz	4.8E-05	5.7E-05	6.4E-05	4.3E-05	4.2E-05
		25	27			

* ポンプ電源周波数変更時、アンジュレーターギャップ 20.1mm、プラグ角 7.89°

* アンジュレーターギャップ変更時、ポンプ電源周波数 40Hz、プラグ角 7.89°

* θ 変更時、ポンプ電源周波数 40Hz、アンジュレーターギャップ 20.1mm

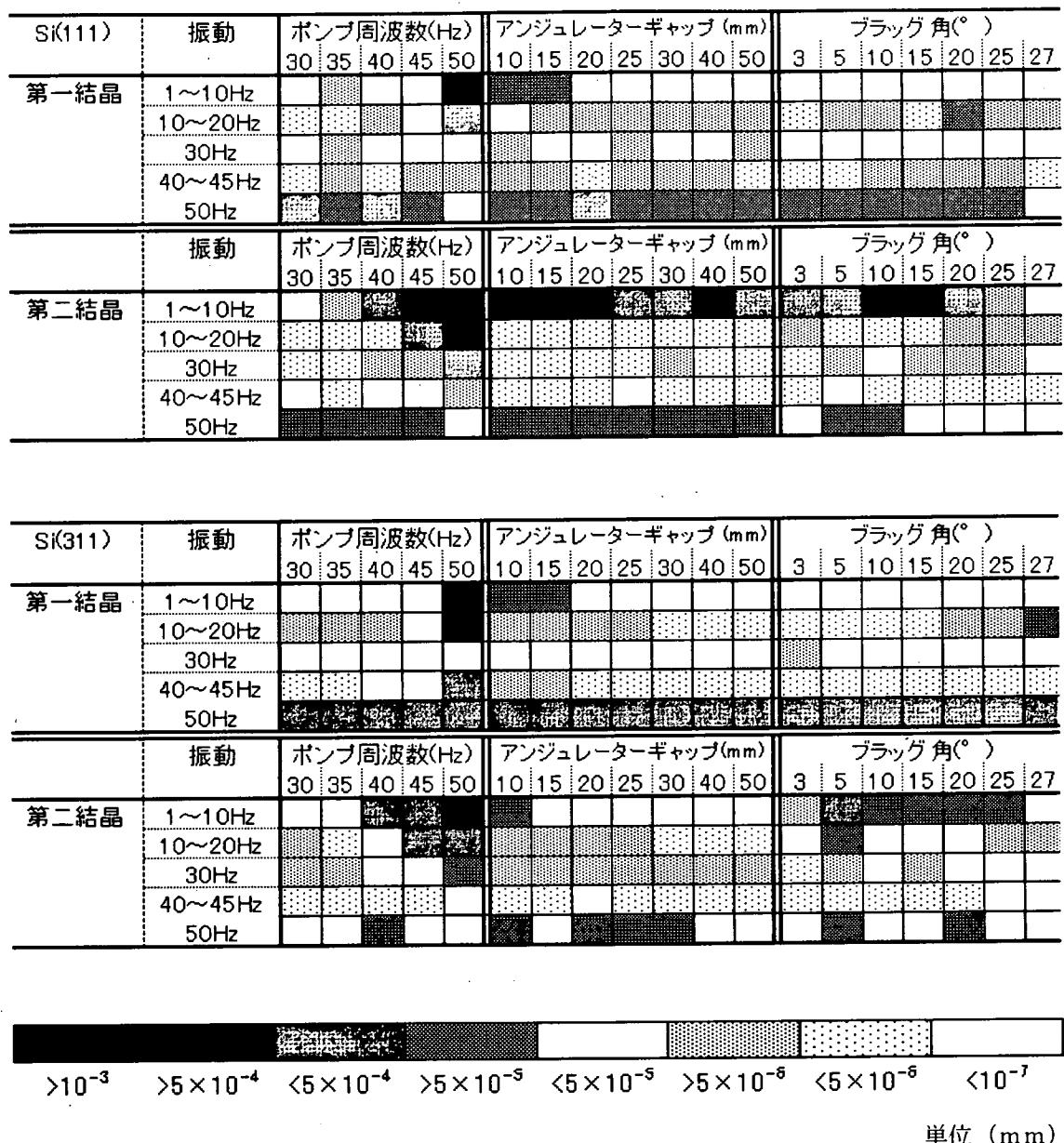
表 6 Si(311)を使用した時の振動成分と振幅 (単位 : mm)

		ポンプ電源周波数 (Hz)						
		30	35	40	45	50		
第一結晶	1~10Hz	2.4E-05	2.0E-05	2.3E-05	3.8E-05	1.6E-03		
	10~20Hz	8.2E-06	7.1E-06	6.5E-06	1.3E-05	8.5E-04		
	30Hz	1.2E-05	1.3E-05	1.6E-05	1.9E-05	1.7E-05		
	40~45Hz	4.5E-06	3.9E-06	3.9E-06	1.3E-05	3.8E-04		
	50Hz	2.2E-04	1.7E-04	2.4E-04	1.9E-04	1.9E-04		
第二結晶	1~10Hz	2.1E-05	1.4E-05	1.0E-04	1.6E-04	2.3E-03		
	10~20Hz	7.5E-06	4.7E-06	1.5E-05	1.1E-04	1.9E-04		
	30Hz	6.4E-06	6.9E-06	1.1E-05	1.2E-05	8.4E-05		
	40~45Hz	1.3E-06	1.4E-06	1.9E-06	4.2E-06	2.6E-05		
	50Hz	4.5E-05	4.4E-05	5.1E-05	4.2E-05	3.6E-05		
		アンジュレーターギャップ (mm)						
第一結晶		10	15	20	30	40		
	1~10Hz	7.5E-05	6.1E-05	1.8E-05	1.3E-05	1.3E-05		
	10~20Hz	6.3E-06	7.6E-06	6.2E-06	5.9E-06	4.3E-06		
	30Hz	1.2E-05	1.4E-05	1.7E-05	1.2E-05	1.3E-05		
	40~45Hz	8.2E-06	7.7E-06	3.0E-06	3.6E-06	2.9E-06		
第二結晶		50						
	1~10Hz	2.0E-04	1.9E-04	2.3E-04	3.0E-04	2.5E-04		
	10~20Hz	6.6E-06	2.4E-05	2.0E-05	1.6E-05	2.0E-05		
	30Hz	6.6E-06	6.6E-06	5.2E-06	5.2E-06	4.9E-06		
	40~45Hz	2.1E-06	1.4E-06	9.9E-07	1.6E-06	1.5E-06		
		50Hz	5.0E-05	4.4E-05	5.7E-05	6.7E-05	6.0E-05	
プラグ角 (°)								
第一結晶		3	5	10	15	20	25	
	1~10Hz	2.2E-05	1.8E-05	1.9E-05	1.9E-05	1.5E-05	1.7E-05	
	10~20Hz	2.0E-06	4.5E-06	2.9E-04	3.9E-06	6.8E-06	5.4E-06	
	30Hz	9.4E-06	1.3E-05	2.9E-05	1.3E-05	1.5E-05	1.3E-05	
	40~45Hz	4.0E-06	3.2E-06	2.8E-06	3.5E-06	4.3E-06	4.2E-06	
第二結晶		27						
	1~10Hz	1.1E-04	2.2E-04	2.5E-04	1.9E-04	2.2E-04	1.4E-04	
	10~20Hz	9.9E-06	1.5E-04	9.5E-05	9.2E-05	8.1E-05	5.9E-05	
	30Hz	1.3E-05	7.3E-05	2.9E-05	2.0E-05	2.8E-05	9.1E-06	
	40~45Hz	3.6E-06	5.4E-06	1.4E-05	9.6E-06	1.2E-05	1.0E-05	
		50Hz	1.9E-06	2.3E-06	1.5E-06	1.3E-06	1.0E-06	8.5E-07
		4.7E-05	6.1E-05	4.9E-05	4.1E-05	5.6E-05	4.4E-05	
4.7E-05								

* ポンプ電源周波数変更時、アンジュレーターギャップ 20.1mm、プラグ角 7.89°

* アンジュレーターギャップ変更時、ポンプ電源周波数 40Hz、プラグ角 7.89°

* θ 変更時、ポンプ電源周波数 40Hz、アンジュレーターギャップ 20.1mm



- * ポンプ電源周波数変更時、アンジュレーターギャップ 20.1mm、プラグ角 7.89°
- * アンジュレーターギャップ変更時、ポンプ電源周波数 40Hz、プラグ角 7.89°
- * θ 変更時、ポンプ電源周波数 40Hz、アンジュレーターギャップ 20.1mm

図 7 Si(111)及びSi(311)を使用した時の振動成分とその振幅の程度

次に、ピームライン運転中に使用する機器である液体窒素循環冷却装置ポンプ、コンプトン散乱ブロック冷却水、ダイレクトピームキャッチャー冷却水、ターボ分子ポンプの冷却用ファンをそれぞれ停止させた状態にして、それぞれの条件で 50Hz 付近の振動を 5 秒間測定した結果を表 7 に示す。その結果、ターボ分子ポンプのファン（ターボ分子ポンプ本体に固定されている。）を止めた条件が、第一・第二結晶共に、他の条件に比べて 50Hz 付近の振幅が少なくなった。他条件間では振幅の大きさにあまり差異は無かった。

表 7 Si(111) の各条件での 50Hz 付近の振幅大きさの変化
(MBS 閉が基準 ; 数値単位mm)

条件	第一結晶	第二結晶
MBS閉	9.18E-04	6.42E-04
液体窒素循環冷却装置ポンプ停止	8.52E-04	6.12E-04
コンプトンシールド冷却水停止	7.76E-04	6.08E-04
ダイレクトピームキャッチャー冷却水停止	7.79E-04	5.78E-04
ターボ分子ポンプファン停止	1.77E-05	1.47E-05

* : Si(111)、第一結晶及び第二結晶、MBS 閉、プラッグ角 7.89°

2. 2. 3 バイヨネットジョイント部の振動

分光器にある液体窒素のバイヨネットジョイント（図 8）に直接振動計をあてて振動を測定した結果を図 9 に示す。その結果、バイヨネット部の振動成分は 1~10Hz が顕著であった。

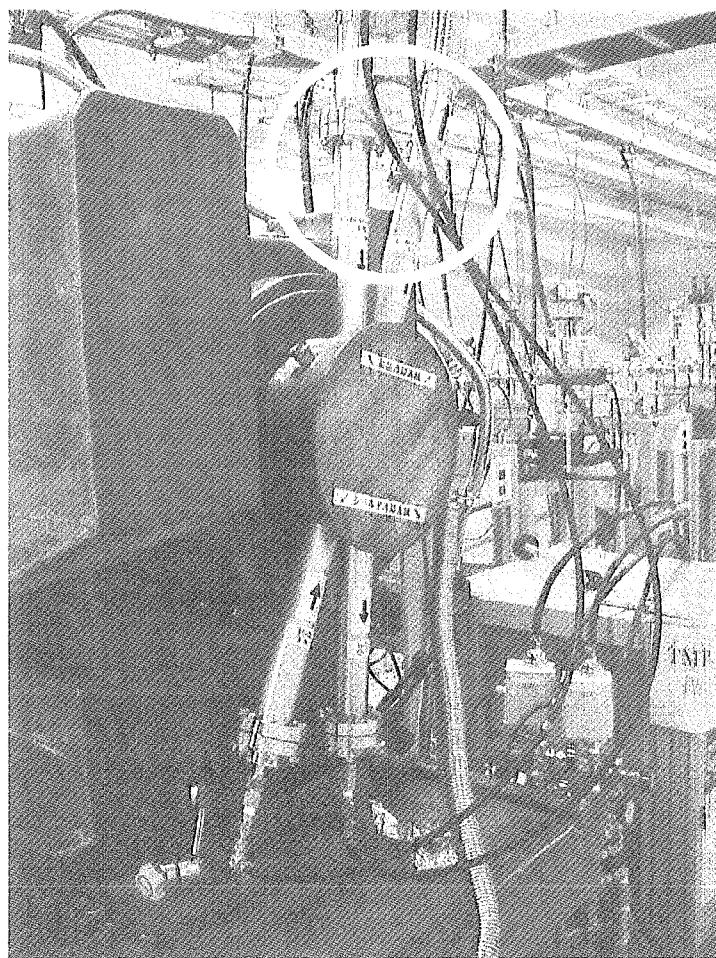


図8 分光器のバイヨネットジョイントと振動計測部（白丸部）
液体窒素配管はハッチ上部に向かって伸びている

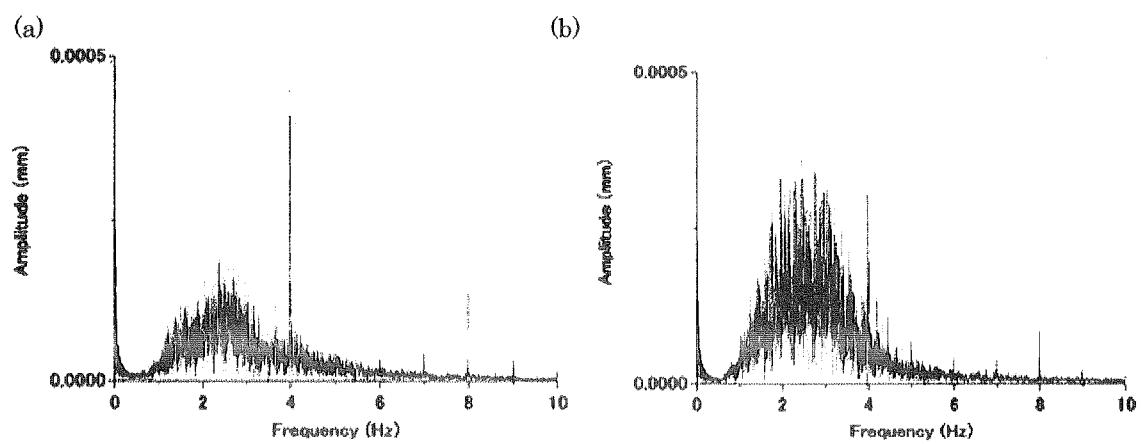


図9 分光器のバイヨネットジョイントの振動

(a) 液体窒素(入)配管、(b) 液体窒素(出)配管
液体窒素循環ポンプ電源周波数 40Hz、MBS 閉

2. 2. 4 液体窒素の温度・内圧・流量測定

液体窒素の温度、内圧、流量の測定結果を図 10、11、12 に示す。液体窒素の冷却に使用している 3 台の熱交換器の温度を示す TC1、TC2、TC3 を見てみると、どの温度についても温度制御による数分程度の周期的な変動が見られた。圧力に関して、PS2 はほぼ変動しないのに対して、PS1 は数分毎に突如として起こる 5~10kPa 程度のスパイク的な変動が見られた。液体窒素流量も小刻みに変動するだけでなく、突発的に流量が変化することがわかった。温度、内圧、流量を示す図 10、11、12 の時間軸を同じタイミングで比較してみると、PS1 の大きな圧力変化と流量の変化のタイミングがほぼ一致しており、相関性があるように思われる。

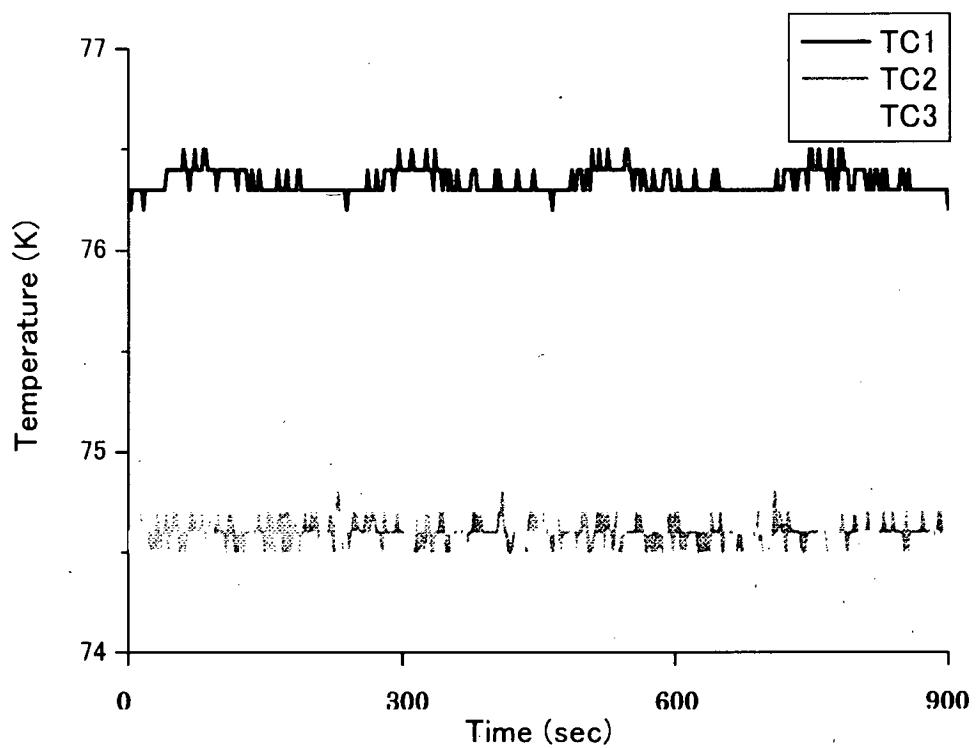


図 10 液体窒素循環冷却装置の熱交換器温度の時間変化

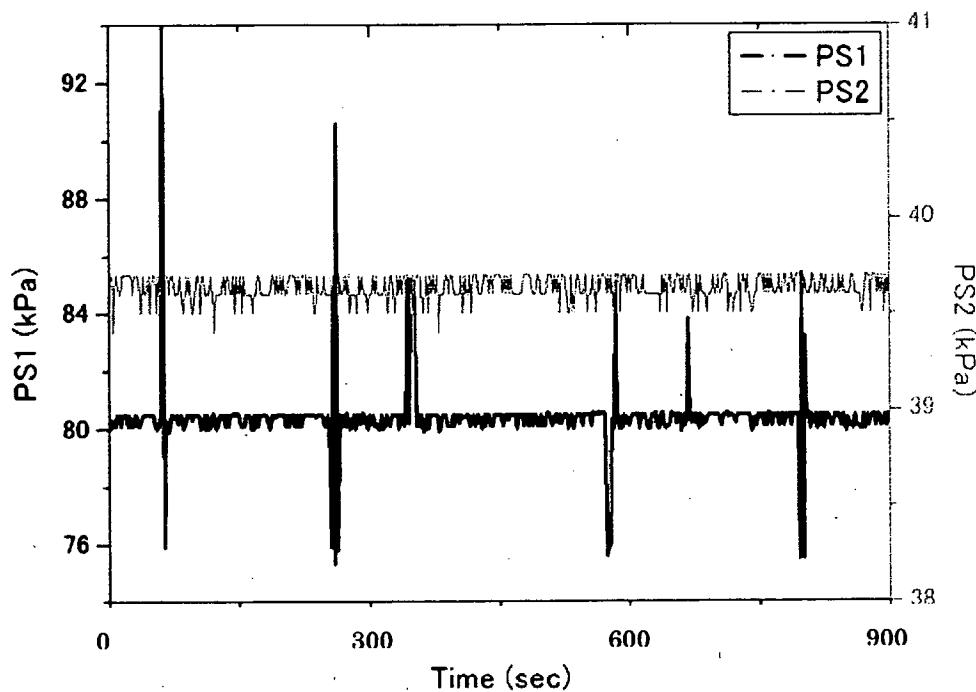


図 11 液体窒素循環冷却装置内の圧力の時間変化

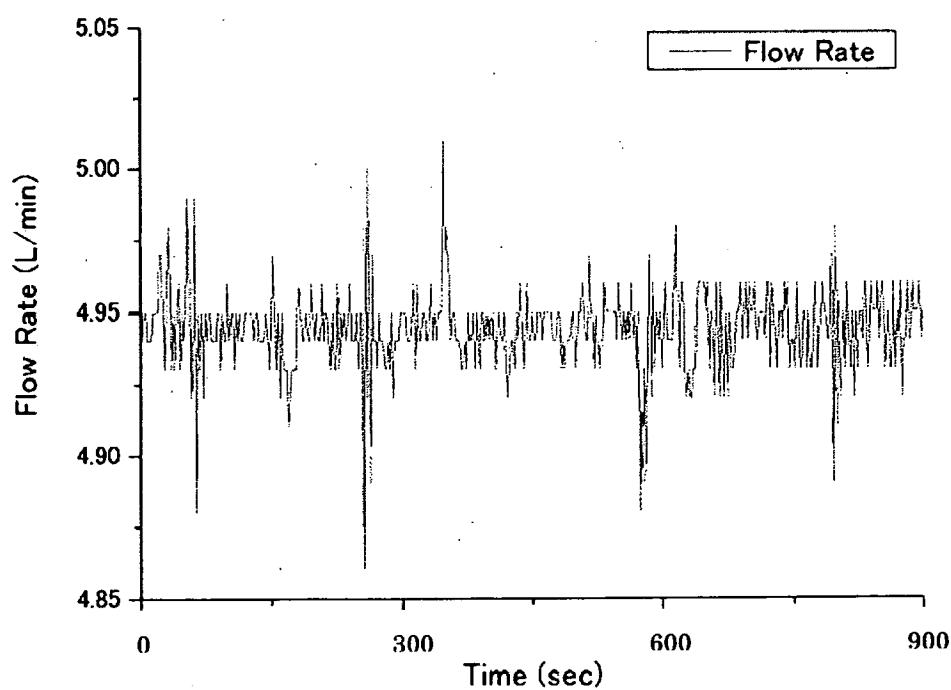


図 12 液体窒素流量の時間変化

2.3 考察

出射光の時間的強度変化は、種々の原因によって分光結晶が振動することで、分光器の第一結晶と第二結晶の平行度がくずれることが原因であると推測される。問題は、その振動源が何かということである。特に、出射光の時間的強度変化は数分周期の変動と秒毎のばらつきを持つ変動があるので、それぞれに対して振動源を探る必要がある。1~125Hz の範囲における振動測定の結果、液体窒素循環のためのポンプ電源周波数が 45Hz 以上になる (=流量が増加する) と、分光結晶の振動の程度が大きくなることがわかった。そして、ポンプ電源周波数が同様に 45Hz 以上になると出射光の時間的強度変化が大きくなることがわかった。これらの結果は、すなわち、液体窒素の流れが振動源の可能性を示している。ただし、ポンプ電源周波数を下げるとき出射光の変動が小さくなるわけではない。これは液体窒素の流量によって変化する振動と液体窒素配管の固有振動数とが関係するためかもしれない。

1Hz 以上の振動の対策のために、測定された振動の周波数成分を 1~10Hz、10~20Hz、30Hz 付近、40~45Hz、50Hz 付近に分類し、特に振動の程度が目立って大きい 1~10Hz、30Hz 付近、50Hz 付近の振動対策を重点的に考えることにした。前述の通り、分光結晶の 1~10Hz の振動成分は、液体窒素循環冷却装置のポンプ電源周波数が高くなるほど大きくなつた。また分光器の液体窒素のバイヨネットジョイントに見られた振動成分は、分光結晶に見られた 1~10Hz の振動成分と同様であった。また、アンジュレーターギャップが小さいほど振動が大きくなることは、アンジュレーターギャップを小さくすることで結晶への熱負荷が増加し、それによって液体窒素配管内の内圧・流量が変化するためではないかと考えられる。分光結晶角度を変化させることによって振動が系統的に変化することは無かつたが、いくつかの分光結晶角度の条件で振動が大きくなつたことは、分光器内の液体窒素配管の形状も変化することで液体窒素配管の固有振動数変化するためだろう。これらの結果は、1~10Hz の振動源は液体窒素配管を流れる液体窒素であることを示唆している。また、コンプトンシールド板冷却水もこの周波数帯域の振動発生源として可能性がある。

30Hz、50Hz の振動は各パラメーターの変化に関係しておらず、どの条件下でもほぼ同様の値を示していた。このことから 30Hz・50Hz の振動は分光器外部から伝播してきていると考えられる。30Hz の振動源として、回転一次成分が 29.4Hz であるスクロールポンプが上げられる[6]。BL11XU でも相田ら[6]の報告するスクロールポンプと同じポンプを使用していることから、当ビームラインで測定された 30Hz の振動源はスクロールポンプであろう。また、50Hz の振動源は、MBS 閉の状態でターボ分子ポンプのファンを停止させた時に他条件よりも振幅が小さくなつたことから、ターボ分子ポンプのファンと考えられる。

循環させている液体窒素に観測された流量、圧力、温度の変動は装置に因るものだと考えられる。その中で流量、圧力の変動に相関がみられたことは、圧力の変動を抑えることによって流量の変動が抑えられることを示している。そして、流量の変動を抑えることで分光結晶の振動を抑えることが期待できる。ただし、圧力の変動は定期的でなく不定期であつたり、スパイク状に変化したりすることから、液体窒素の流量や圧力の安定化は、分光結晶に見られる上述の周波数の振動の抑制のためというよりも、数分周期の出射光強度の変化に対して効果があるだろう。

また、循環する液体窒素温度が流量の不安定性に影響を与えていていると言われている[3]。温度をできるだけ一定にすることが望ましい。

これらのことと踏まえて、分光結晶の振動を抑制し、出射光の時間的強度変化を少なくするために、BL11XUとして次のような対策を施すことが有効であると考えた。

まず、液体窒素ポンプ電源周波数を出射光の時間的強度変化が比較的少なかった条件である40~43Hz程度の適値に設定することがよい。液体窒素流量は装置の状態によって若干変化する場合があるので、最終的な設定値を決定する時は、流量を目安になるように液体窒素循環ポンプ電源周波数を調整するとよいだろう。つまり、流量では4.7~4.9L/minとなる(図4)。

別の手段として、近年SPring-8で用いられている振動を出射光に影響を及ぼさないためのシステム、MOSTAB(Monochromator Stabilization)[9]がある。このMOSTABは、振動を直接抑える方法ではないが、測定している出射光の強度が光学系の熱ドリフトや結晶歪によって変化した場合に分光結晶に取り付けたピエゾ素子を用いてフィードバック制御をかけて、出射光の強度を安定化させるものである。原研アンジュレータービームラインBL22XUではMOSTABがすでに導入されており、出射光の時間的強度変化が十分に抑えられている[4]。BL11XUでもMOSTAB調整を進めているが動作が安定しない状況があった。この原因は分光器の振動である可能性があった。MOSTABの調整のためにも、あらかじめ分光結晶の振動対策を十分に行う必要があると考えている。

1~10Hzの振動対策として、分光結晶の振動が最も少なく、かつ流量が最も多い条件を満たすポンプ電源周波数を40Hz付近に設定すること、液体窒素配管を固定して制振したり、配管の固有振動数を変えて振動を抑制したりすることが有効であると考える。また、分光器内のダイレクトビームキャッチャーやコンプトンシールド板の冷却水配管の振動を抑制することも必要だろう。

30Hzの振動対策として、スクロールポンプの振動を真空配管や分光器に伝わらないようにするか、スクロールポンプの振動を抑えることが必要だろう。

50Hzの振動対策として、ターボ分子ポンプの冷却用のファンをターボ分子ポンプ本体から取り外して、別場所に取り付けてターボ分子ポンプを冷やすことが、振動を抑制するのに効果的であると考えられる。

これらの振動対策の振動対策前後で振動状態を調べ、効果の有無を調べていくことで、分光結晶の振動を抑えることができるだろう。

液体窒素の流量や圧力に見られる変動を抑える対策として、流量、圧力の変動が起こりにくい状態を探るために、熱交換器の温度設定を調整することも対策の一つとなるだろう。他の対策として、液体窒素配管内にヘリウムを注入することが上げられる。ヘリウムを注入することは、ヘリウムがクッション的な役割を果たして300Hz付近の振動を安定させる[7]だけでなく、圧力と流量のスペイク状の変動を無くす効果があることがわかっている[8]。これらの変動が出射光強度の変動と関係していれば、出射光の強度は安定するはずである。

3. 振動対策

3. 1 方法

3. 1. 1 分光結晶の1~10Hz 振動対策

振動測定の結果から、1~10Hz の振動源は液体窒素や冷却水の流れによるものと考えられるので、分光器内の液体窒素配管とコンプトンシールド板冷却水配管、分光器外部のバイヨネットジョイントに対策を施した。

<分光器内対策>

これまでに鉛毛による配管の固定によって振動抑制の効果が報告されている[3]。そこで、BL11XU では鉛毛をカプトン膜で包み、無酸素銅線で縛ったもの(図 13)を第一結晶ステージに接続されている液体窒素配管に取り付けた(図 14)。配管への固定には無酸素銅線を用いた。

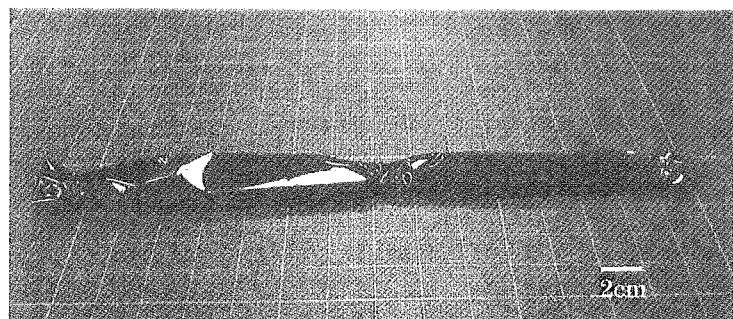


図 13 鉛毛
カプトン膜で鉛毛は包まれている。

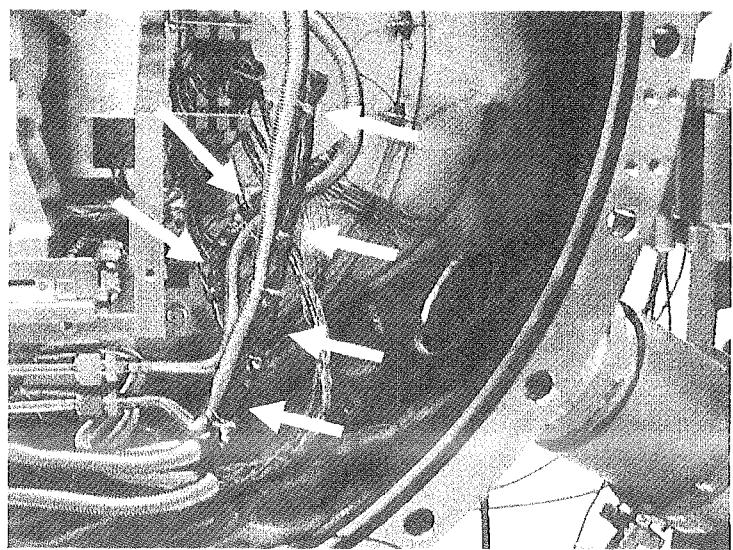


図 14 分光器内の液体窒素配管への鉛毛の固定 (矢印部)
配管は写真上に向って第一結晶(ホルダー)に接続されている。

また、BL11XU 分光器内には、分光器の第一結晶からのコンプトン散乱による第二結晶ステージの過熱を防ぐためにコンプトンシールド板を取り付けている。分光器を大気開放している時にそのシールドを冷却するための冷却水配管を手で触れて振動を感じる場所を探し、その中で特に振動を感じた 2箇所にカプトンで包んだ鉛毛を取り付けた（図 15）。

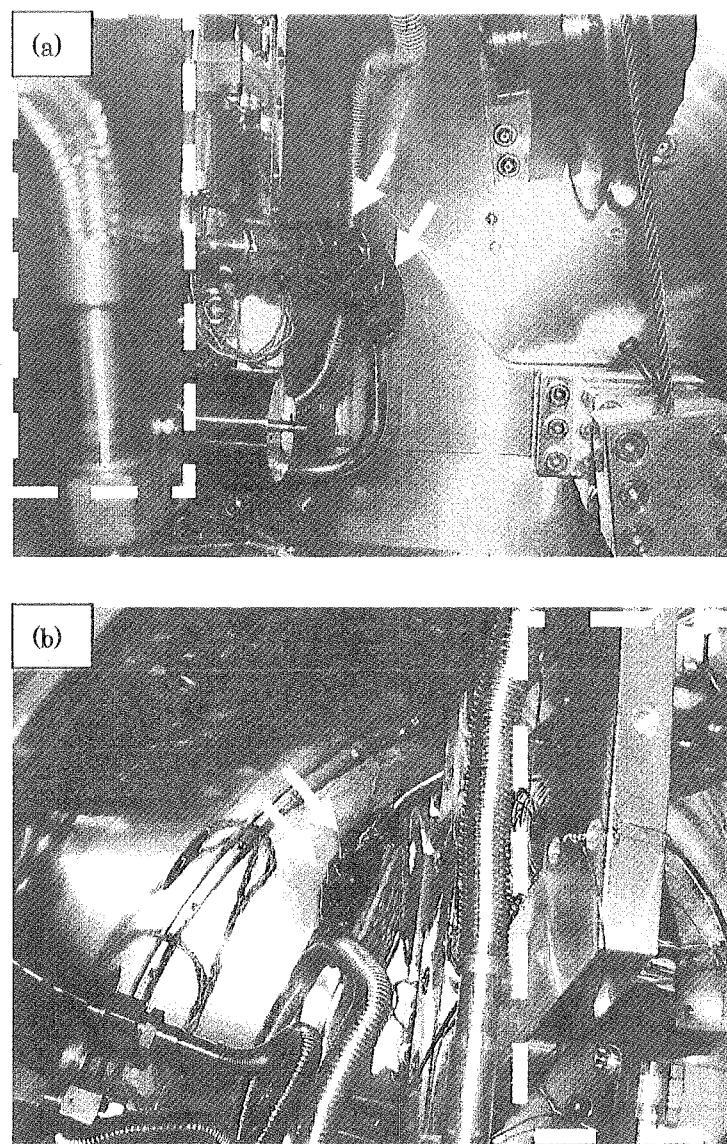


図 15 コンプトンシールド循環冷却水配管に巻きつけた鉛毛（矢印部）。

- (a) コンプトンシールドの前に位置する配管部分（白鎖線内部：コンプトンシールド板）
- (b) 第二結晶ホルダー後に位置する配管部分（白鎖線内部：第二結晶ステージ）

＜分光器外対策＞

分光器外部の液体窒素のバイヨネットジョイントの液体窒素配管(出)と配管(入)を固定具によって固定した(図 16)。固定具はネジ止めしている。固定具が配管に接触する場所にはゴムシートを挟んでいる。

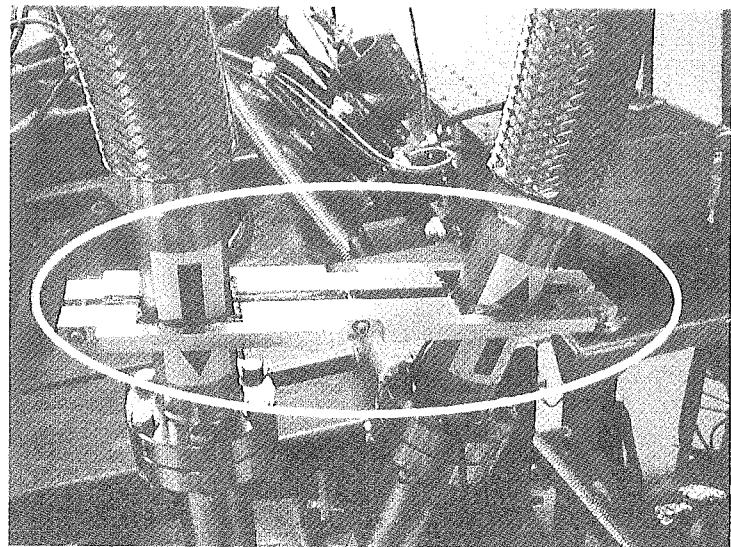


図 16 分光器外部の液体窒素導入配管の固定（白丸部）

3. 1. 2 分光結晶の 30Hz 振動対策

BL11XU で使用されているスクロールポンプに、29.4Hz の振動を抑える効果を持つスクロールポンプ制振装置[6]を取り付けた。制振装置を取り付けたポンプを含む排気ユニットは、分光器に最も近い上流側スクロールポンプ、分光器排気用スクロールポンプ、分光器に最も近い下流側スクロールポンプ、及びその下流側ポンプの一つ下流のスクロールポンプの計 4箇所である(図 17)。

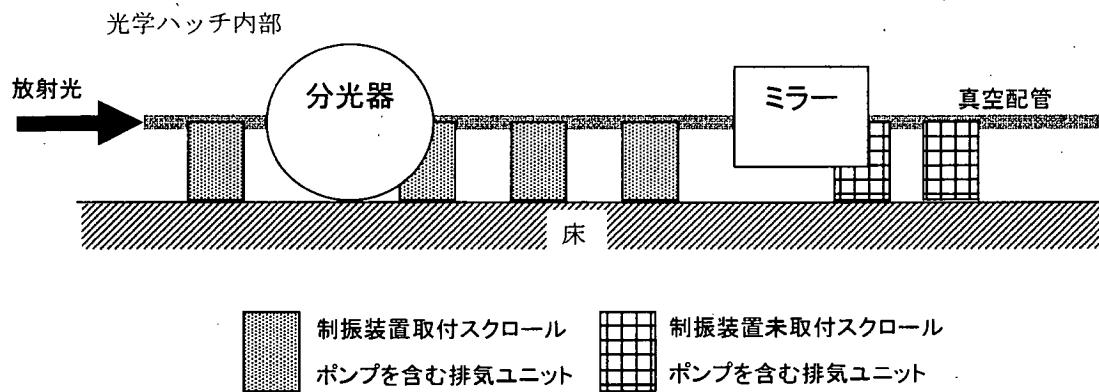


図 17 BL11XU 光学ハッチのスクロールポンプ制振装置取り付け箇所

3. 1. 3 分光結晶の 50Hz 振動対策

分光器に直付けされているターボ分子ポンプ及び輸送部の真空排気装置に接続されているターボ分子ポンプのファンを、ターボ分子ポンプ本体より取り外して架台に取り付け、ターボ分子ポンプ本体に直接接触しないようにした(図 18、19)。ポンプとファンとの距離はほぼ同じように取り付け、ファンによる冷却効果が落ちることの無いよう配慮した。また、架台とファンの取り付け箇所の間には、厚さ 1mm のゴムシートをはさんだ(図 20)。

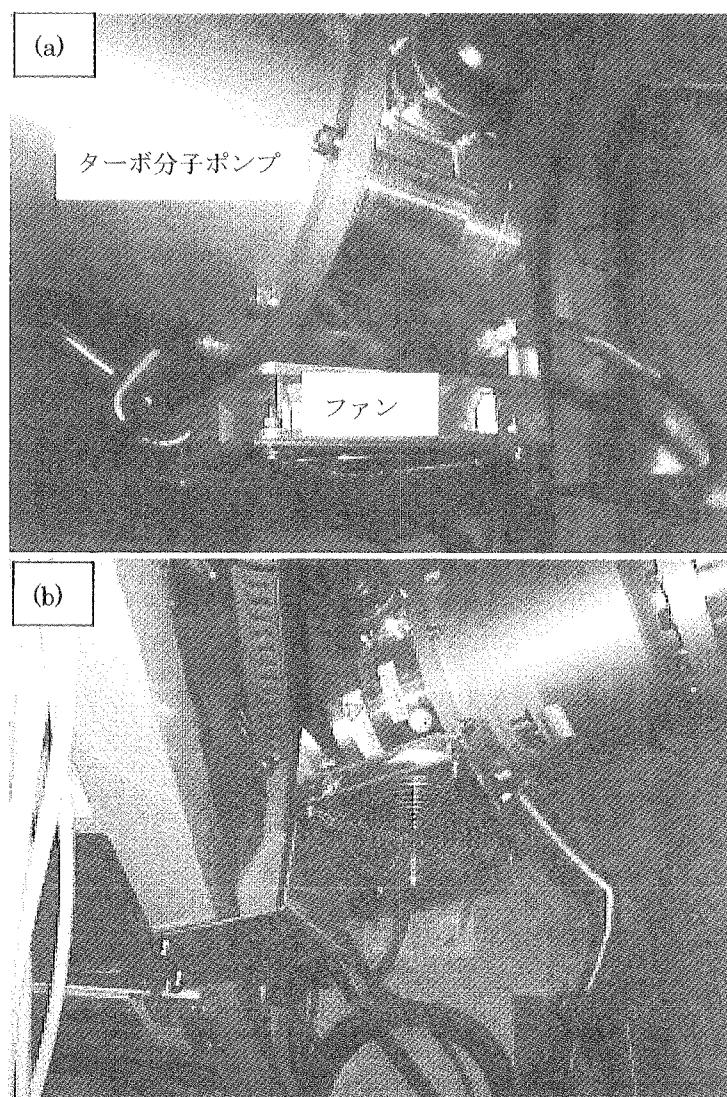


図 18 分光器に直付けされたターボ分子ポンプのファンの取り外し

(a) 取り外し前、(b) 取り外し後

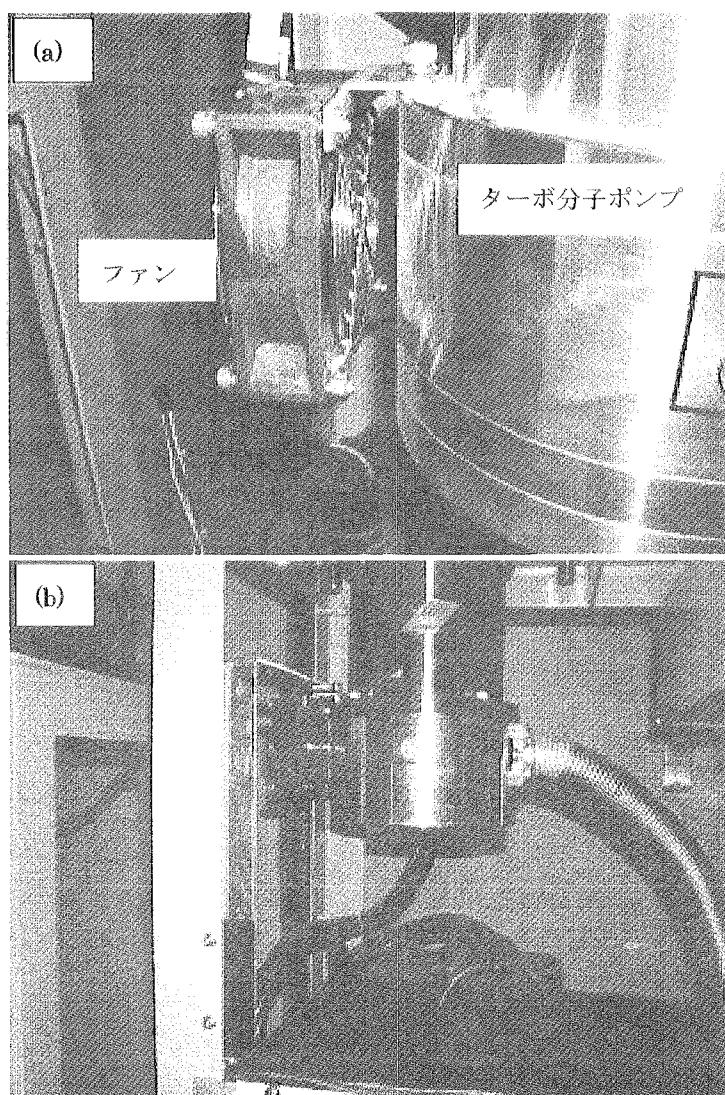


図 19 輸送部の真空排気装置のターボ分子ポンプのファンの取り外し
(a) 取り外し前、(b) 取り外し後

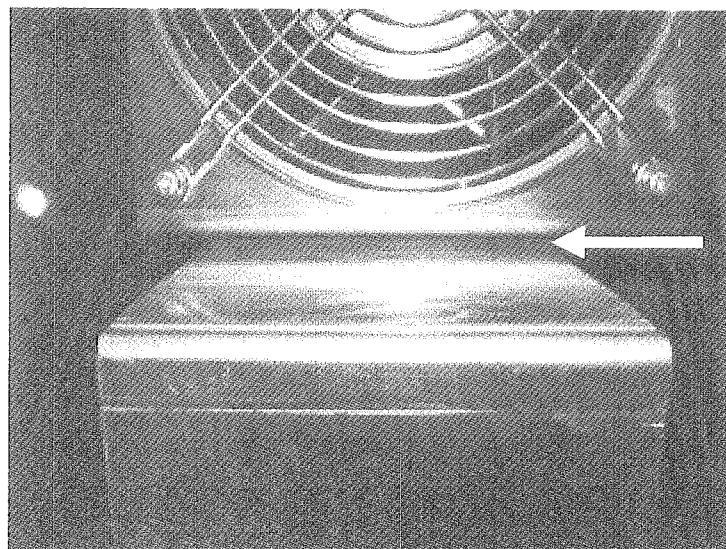


図 20 ファンの振動対策

ファンの振動がアームから架台に伝わらないように、1mm厚のゴムシート（矢印部）をファンとアーム間に挿入している

3. 1. 4 液体窒素の温度・圧力・内圧の変動対策

振動測定結果に示したように、液体窒素配管圧力 PS1 と流量の変化は密接な関係があるため、流量を安定させるために PS1 を安定させることができると考えられる。そこで、配管内に存在する窒素ガスをヘリウムで置換することでスパイク状の圧力変動を抑えるため[8]に、液体窒素配管内にヘリウムガスを注入した。注入速度は 1L/min で、注入時間は 10 分間である（計 10L 注入）。注入によって内圧、液体窒素液面などが変化するが、約 2 時間後に注入前の元の値に戻った。その時の内圧 PS1 を注入前の内圧 PS1 と比較した。

次に、液体窒素循環冷却装置の冷凍機の設定温度（温度計 SV 値）を変更した[3]。熱交換器三台の設定温度をそれぞれ個別に変化させ、10 通りの条件でそれぞれの内圧 PS1 の値の変化を測定した。

3. 2 結果

以下に述べる結果の順番と対策時期の順番は同順ではない。また、振幅の大きさは測定条件（放射光照射時と未照射時、分光器の角度など）によって異なっている。そのため、違う振動対策の効果の比較よりも、ある振動対策の前後の効果の比較に着目していただきたい。

3. 2. 1 分光結晶の1~10Hz 振動対策

MBS 閉、分光結晶角度 7.89° の条件で分光器内の液体窒素配管の固定を行った時の振動を図 21 に示す。この対策の結果、振動計で測定された 2Hz 付近の振動が約 4 分の 1 以下に 1Hz 付近の振動が約 10 分の 1 に減少した。4Hz の振動は消えなかった。

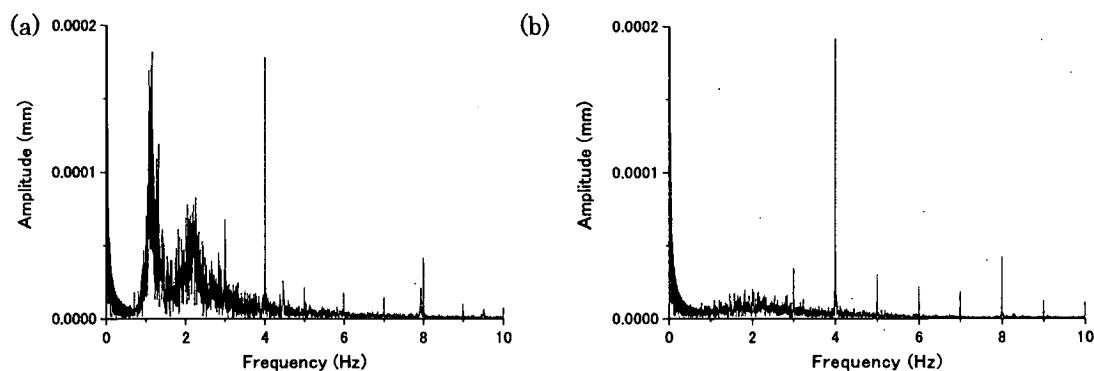


図 21 分光器内の液体窒素配管の鉛毛固定による振動対策

(a) 振動対策前、(b) 振動対策後

鉛毛の振動対策前後で出射光の時間的強度変化を測定した結果を図 22 に示す。振動対策前の強度変化の割合が 2.839% (標準偏差 : 0.0037) であったのに対し、振動対策後は 0.852% (標準偏差 : 0.0011) となった (図 22)。

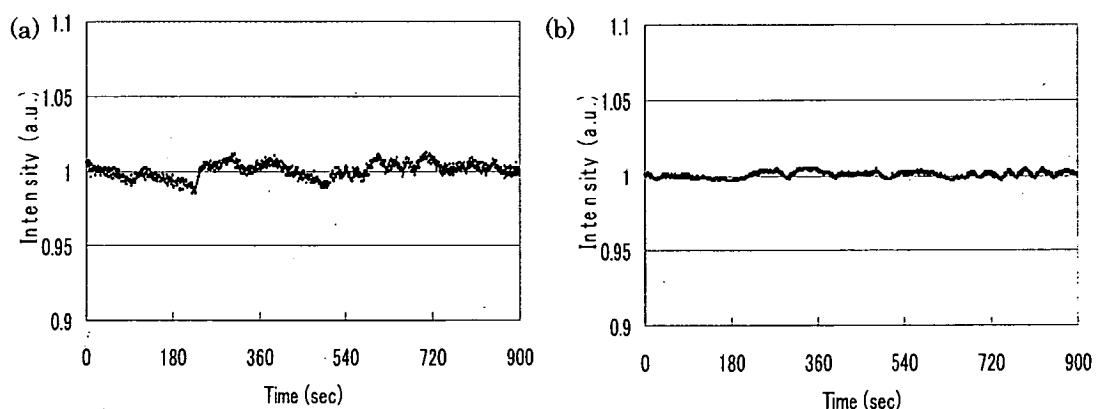


図 22 出射光の時間的強度変化

(a) 鉛毛による振動対策前、(b) 鉛毛による振動対策後

MBS 閉、分光結晶角度 7.89° の条件で分光器のバイヨネットジョイントの固定を行った。図 23 に液体窒素配管(入)及び配管(出)の固定前、固定後の振動を示す。対策の結果、液体窒素配管(入)、配管(出)の振動は共に振幅の程度が約 3 分の 2 になった。

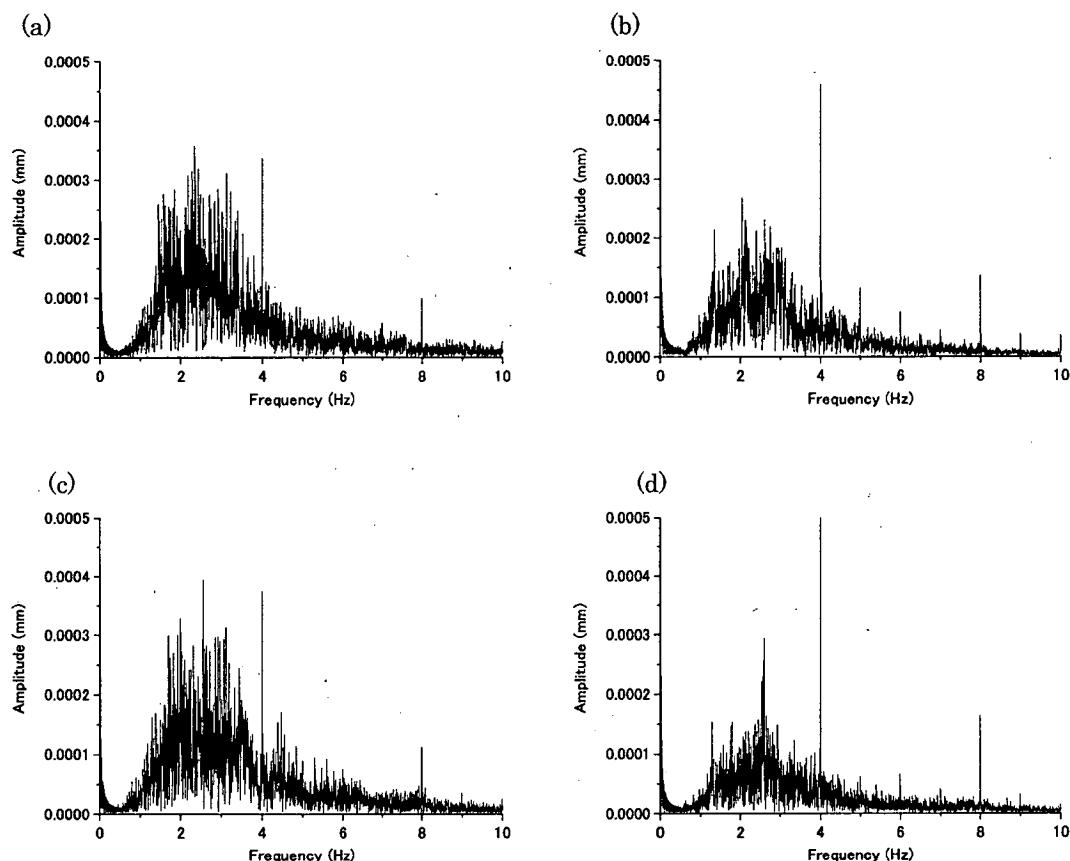


図 23 分光器の液体窒素導入配管の振動対策
 (a)配管(入)の振動、対策前、(b)配管(入)の振動、対策後、
 (c)配管(出)の振動、対策前、(d)配管(出)の振動、対策後

MBS 閉、プラグ角 7.89° 、アンジュレーターギャップ 20.1 mm の条件でコンプトンシールド冷却水配管に鉛毛を取り付ける前と後の振動を図 24 に示す。鉛毛取り付け前後で 1~10Hz の振動は全体的に半減した。

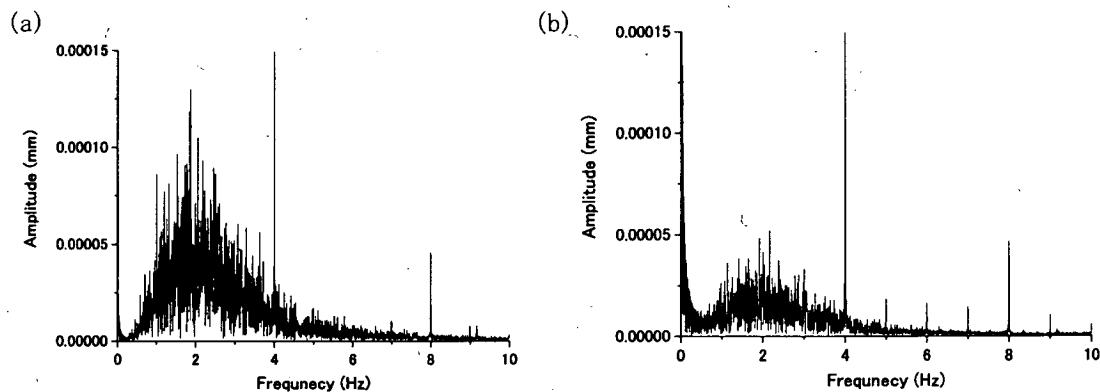


図 24 1～10Hz の振動の低減

- (a) コンプトンシールド冷却循環水の振動対策前、
 (b) コンプトンシールド冷却循環水の振動対策後

分光器内のダイレクトビームキャッチャー用の冷却水配管が、相当振動していることが手を触ることで確認された。そのため、配管の振動が感じられなくなる程度まで冷却水流量を減少させた。しかし、その対策後に結晶ステージに取り付けられている振動計の測定結果では、1～10Hz の振動は同等の振幅であった。よって冷却水配管の振動は、分光結晶に見られた 1～10Hz の振動源とは異なると考えられる。

3. 2. 2 分光結晶の 30Hz 振動対策

MBS 開、プラグ角 7.89°、アンジュレーターギャップ 20.1mm の条件で、スクロールポンプの制振装置を取り付ける前後の振動を図 25 に示す。制振装置取り付けの結果、30Hz 付近の振動の最大値が、 2.6×10^{-5} mm から 1.4×10^{-5} mm に半減した。

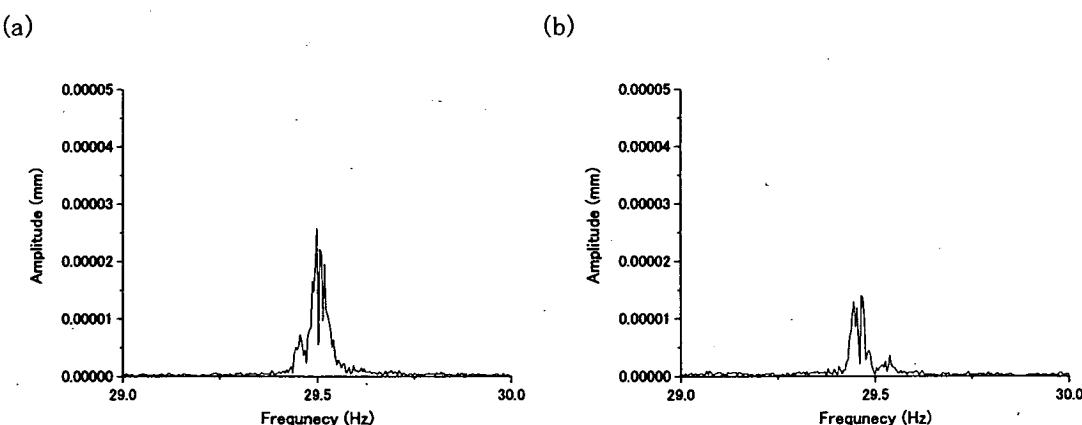


図 25 30Hz 付近の振動対策

- (a) スクロールポンプ制振装置取り付け前、(b) スクロールポンプ制振装置取り付け後

他の対策として、ターボ分子ポンプとスクロールポンプの間のメタル製フレキシブルチューブを、両端にメタル製フランジを取り付けた真空耐圧ゴムホース（外径 50mm、内径 25mm、長さ 100mm）に変更した。ゴムホースによる振動抑制効果を期待したが、30Hz の振動の振幅は同程度で効果はなかった。

3. 2. 3 分光結晶の 50Hz 振動対策

MBS 閉、プラグ角 7.89°、アンジュレーターギャップ 20.1mm の条件で、ターボ分子ポンプファンを取り付けていた状態の時と架台に取り付け直した状態の時の振動を図 26 に示す。50Hz 付近の振動のピークが 1.0×10^{-4} mm あったのに対し、振動対策後では 1.0×10^{-6} mm になり、振幅の大きさは二桁小さくなった。

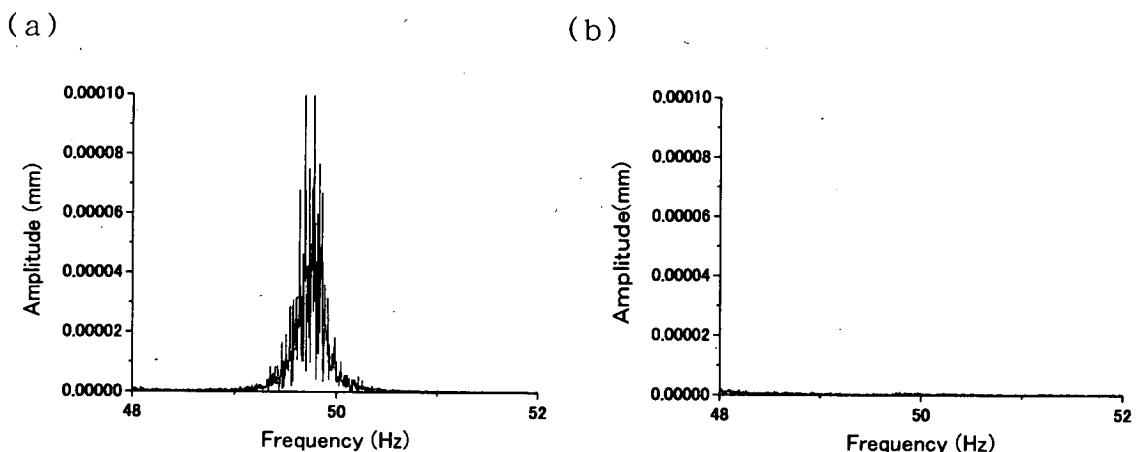


図 26 50Hz 付近の振動対策

- (a) ターボ分子ポンプファン取り付け位置の変更前、
- (b) ターボ分子ポンプファン取り付け位置の変更後

3. 2. 4 液体窒素の温度・内圧・流量の変動対策

<ヘリウムガス注入>

図 27 にヘリウムガス注入前後の内圧の時間変化の結果を示す。液体窒素配管へのヘリウム注入によって、配管内圧力の PS1 の振動は大幅に減少した。条件は、液体窒素循環ポンプ電源周波数 40Hz、MBS 閉である。

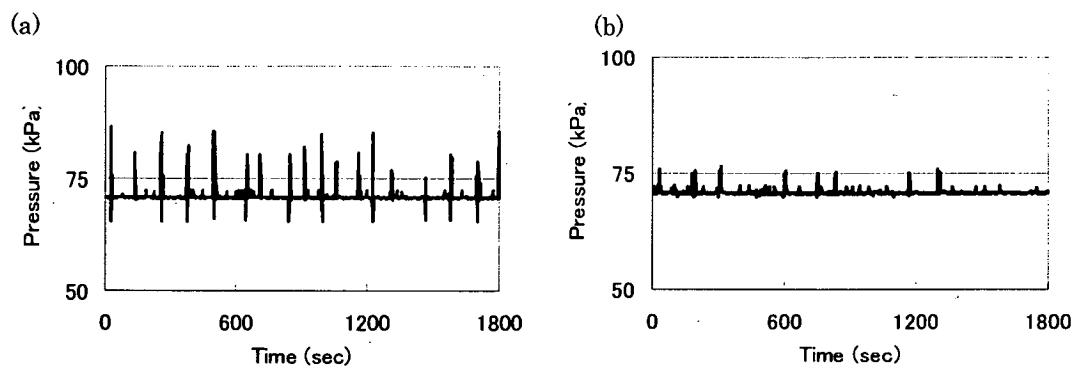


図 27 ヘリウムガスの注入による液体窒素配管圧力 PS1 の時間変化
(a) ヘリウムガス注入前、(b) ヘリウムガス注入後

<熱交換器温度設定変更>

熱交換器の温度を示す TC1, TC2, TC3 の調整設定温度の条件を変えて PS1 を測定した結果を表 8 に示す。結果は設定温度が低いほど安定であるとは限らず、それぞれで PS1 の振動の傾向が異なっていた。BL11XU では TC1=74.0K, TC2=73.5K, TC3=73.5K の時、PS1 の変動が比較的おさまった(図 28)。測定条件は、液体窒素循環ポンプ電源周波数 40Hz、MBS 開、プラグ角 7.89°、アンジュレーターギャップ 20.1mm である。一方、設定温度の変更によって、TC1、TC2、TC3 の温度の揺らぎが改善されることを期待したが、解消されなかった。温度の揺らぎを解消するためには、温度計の PID パラメーターを変更し、温度制御条件を変える必要があると思われる。

表 8 TC1, TC2, TC3 設定温度条件

条件	TC1	TC2	TC3	PS1 の状態*
1)	75.0	75.0	75.0	△
2)	75.0	74.5	74.5	○
3)	75.0	74.0	74.0	2) と同等
4)	75.0	74.0	73.5	2) と同等
5)	74.8	73.8	73.3	2) と同等
6)	74.5	73.5	73.0	×
7)	74.5	74.0	73.5	2) と同等
8)	74.5	73.5	73.5	◎
9)	74.0	73.0	73.0	2) と同等
10)	74.0	73.0	72.5	×

* : ◎とてもよい(図(b))、○よい、△どちらともいえない、×悪い(図(a))

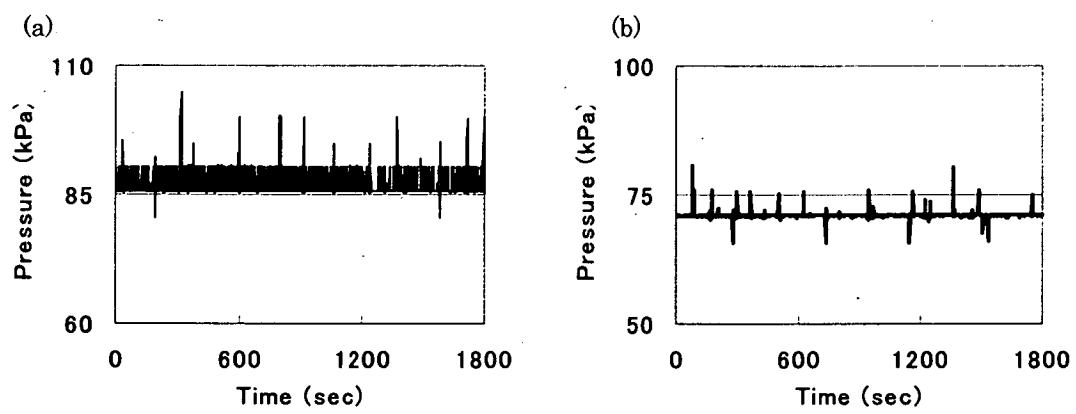


図 28 放射光照射時の液体窒素配管圧力 PS1 の変化
(a) 温度設定が悪い場合(表 1))、(b) 温度設定が良い場合 (表 8))

3. 3 まとめ

今回BL11XUで行った振動対策の項目・内容・効果をまとめると以下のようになつた。振動抑制効果の程度は、解消を◎、改善を○、無効果を△とした。

1) 分光結晶の1~10Hz 振動対策

- | | |
|-----------------------------|------|
| ・液体窒素配管に鉛毛を巻く。[3] | 効果：○ |
| ・コンプトンシールド板冷却水配管に鉛毛を巻く。 | 効果：○ |
| ・液体窒素流量を設定する。 | 効果：○ |
| ・分光器の液体窒素導入配管を固定具で固定する。 | 効果：○ |
| ・ダイレクトビームキャッチャーの冷却水流量を調整する。 | 効果：△ |

2) 分光結晶の30Hz 振動対策

- | | |
|--|------|
| ・スクロールポンプ制振装置[6]を取り付ける。 | 効果：○ |
| ・スクロールポンプ・ターボ分子ポンプ間の
フレキシブルチューブをゴム製にする。 | 効果：△ |

3) 分光結晶の50Hz 振動対策

- | | |
|------------------------|------|
| ・ターボ分子ポンプのファンをポンプから外す。 | 効果：◎ |
|------------------------|------|

4) 液体窒素の流量・内圧の安定化対策

- | | |
|-------------------------|------|
| ・液体窒素配管へヘリウムガスを注入する。[7] | 効果：○ |
| ・冷凍機の設定温度を変更する。[3] | 効果：○ |

今後も引き続いて、残留成分の10~20Hz、40~45Hzの振動対策を進めていく予定である。
また、液体窒素流量や内圧のさらなる安定化も行う予定である。

最終的に、これらの振動対策前後の出射光の時間強度変化を図29に示す。出射光の時間的強度変化の割合として振動対策前に4.47%であったが、対策後は0.85%に減少した。数分周期の大きな変動は改善された。さらに、標準偏差は0.0113から0.0011に減少した。振動対策前に見られた秒毎のばらつきも振動対策後には大きく改善された。

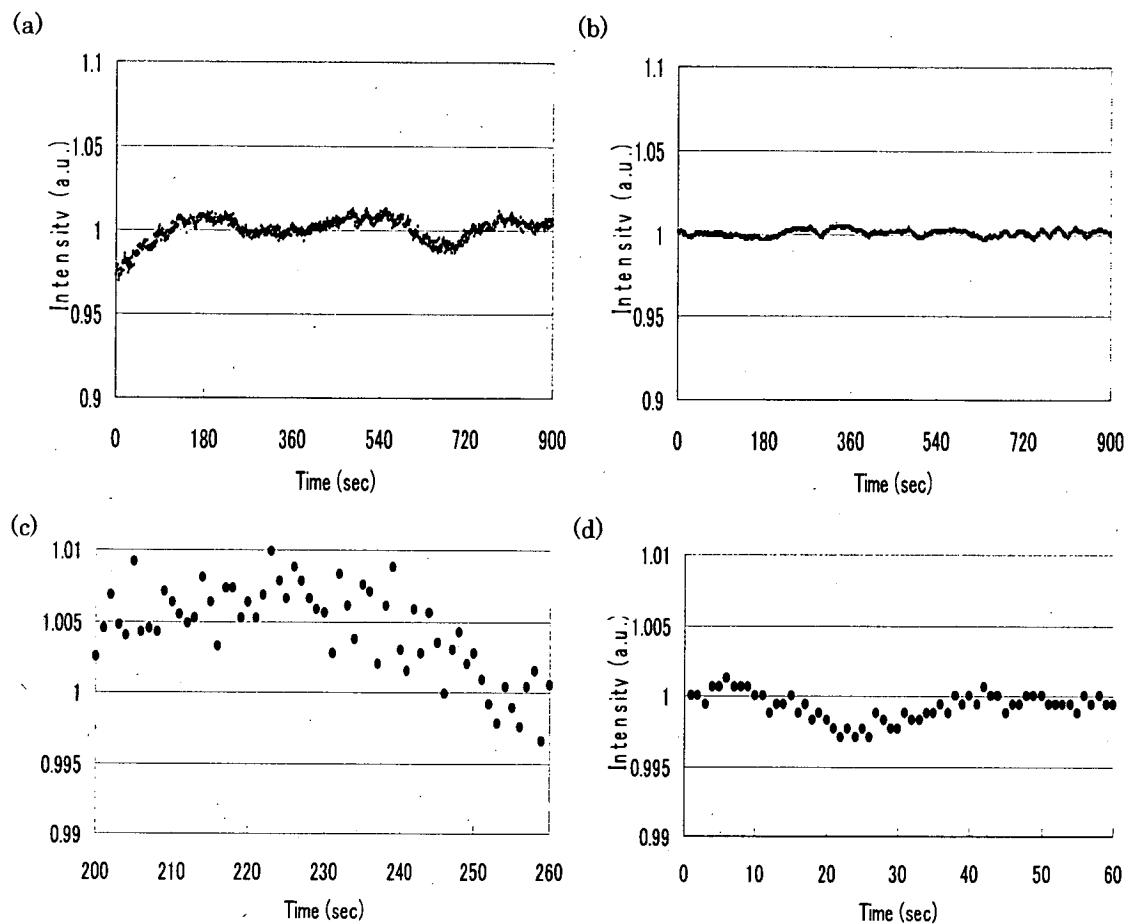


図29 出射光の時間的強度変化
(a)振動対策前、(b)振動対策後、(c) (a)拡大図、(d) (b)拡大図

4. 結論

分光器や液体窒素循環装置の運転条件を系統的に変えて振動状態を測定することで、BL11XUの分光器に見られる振動の詳細が判明した。また、出射光の強度変化やパラメーターの変動の傾向が明らかになった。これらの情報を元に、それぞれの振動を除去するための様々な振動対策を行ったことによって、分光器の振動は抑制された。その結果、出射光の時間的強度変化は振動対策開始前に比べて減少した。今後は、継続的に振動を測定し、引き続き振動対策を進めていく。出射光の時間的強度変化をさらに少なくするために、出射光の強度変化を抑制するシステム、MOSTAB(Monochromator Stabilizer)の調整を進めていくことも必要である。そして、BL11XUの分光器の振動や出射光の時間的強度変化をさらに減少させていく予定である。

謝辞

財団法人高輝度光科学研究所センターの工藤統吾氏、井上忍氏には MOSTAB の調整に関して多数の有意義な助言をいただきました。ここにお礼申し上げます。

参考文献

- [1] SHIWAKU H., MITSUI T., TOZAWA K., KIRIYAMA K., HARAMI T., and MOCHIZUKI T (2003) Cryogenically cooled monochromator with multi-crystal switching system on BL11XU at SPring-8, AIP Conference Proceedings vol.705, Synchrotron Radiation Instrumentation: Eighth International Conference, edited by T. Warwick et al., p659-662.
- [2] TOZAWA K., KIRIYAMA K., MITSUI T., SHIWAKU H., and HARAMI T (2004) Characterization of cryogenically cooled dual symmetric silicon geometry, Si(111)/Si(311), for the double-crystal monochromator on BL11XU at SPring-8, AIP Conference Proceedings vol.705, Synchrotron Radiation Instrumentation: Eighth International Conference, edited by T. Warwick et al., p671-674.
- [3] 玉作賢治、矢橋牧名、望月哲郎、石川哲也 (2001) BL29XUL/19LXU に於ける標準型 2 結晶分光器の液体窒素冷却化、SPring-8 利用者情報、p390-396
- [4] 菖蒲敬久 (2003) BL22XU の現状、原研利用報告会要旨集(平成 15 年 1 月)、p185-198.
- [5] 張小威、杉山弘、依田芳卓 (2001) PIN フォトダイオードによる X 線強度の測定、放射光、第 14 卷第 4 号、p185-198.
- [6] 相田安彦、前田祐治、今村成一、石川哲也 (2002) 磁気ばねを用いた回転機械用制振装置の開発、Proceedings of Dynamics and Design Conference 2002、540.
- [7] TAMASAKU, K., YABASHI, M., MIWA, D., MOCHIZUKI, T., and ISHIKAWA, T. (2002) Performance of cryogenically cooled monochromators at SPring-8. Proceedings of SPIE, p132-141.
- [8] MOCHIZUKI, T., GOTO, S., and ISHIKAWA, T., Present status of SPring-8 cryogenically cooled monochromators, Proceedings of Medsi 2004 Workshop, in press.
- [9] 工藤統吾、西野吉則、鈴木基寛、谷田肇、古川行人、広野等子、石川哲也 (2003) MOSTAB による放射光 X 線ビームの安定化、放射光、第 16 卷第 3 号、p173-177.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表す場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- E C閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 10 \text{ P(ボアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^3 \text{ St(ストークス)}(\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233	
0.101325	1.03323	1	760	14.6959	
1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²	
6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1	

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605 J (計量法) = 4.184 J (熱化学) = 4.1855 J (15°C) = 4.1868 J (国際蒸気表)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁹	
9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹		
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵		
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹		仕事率 1 PS(仏馬力)
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹		
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸		= 75 kgf·m/s
1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1		= 735.499 W

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	2.70270 × 10 ⁻¹⁰		1	100
3.7 × 10 ¹⁰	1			0.01	1

照射線量	C/kg	R	線量当量
	1	3876	
2.58 × 10 ⁻⁴	1		

線量当量	Sv	rem
	1	100
0.01	1	

(86年12月26日現在)

Spring-8 原研アンジュレーター ピームライン BL11XU の分光結晶の振動の現状と対策



古紙配合率100%再生紙を使用しています