

JAERI-Research

94-029



計算機シミュレーションによる水冷式分光結晶の熱解析

1994年11月

中村有夫・橋本眞也・本橋治彦

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、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 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（〒319-11 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 Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

計算機シミュレーションによる水冷式分光結晶の熱解析

日本原子力研究所・理化学研究所大型放射光施設計画推進共同チーム

中村 有夫・橋本 真也・本橋 治彦

(1994年10月1日受理)

分光結晶の温度や熱変形を解析し、光学的性能の劣化を議論した。3種の冷却水路形状について、水冷銅試験体を用いた電子線照射(JEBIS)実験を実施し、結果から各水路面の熱伝達率を得た。同形状のシリコン分光結晶を想定し、得られた熱伝達率を導入して、SPring-8偏向電磁石とWPH-33J(原研試作アンジュレータ)の光を照射した場合の温度分布と熱変形を求めた。

結果として、初期温度27[°C] とすると、偏向電磁石の場合、結晶表面中心は0.27[MW/m²] の熱流束を受けて30[°C] 程度になった。アンジュレータの場合、結晶表面中心は8.2[MW/m²] の熱流束を受けて200~280[°C] 程度になり、結晶表面に23[μrad] (シリコン(111)のダーウィン幅) 以上のうねりが発生することが判明した。

Calculation of Thermal Deformations in
Water-cooled Monochromator Crystals

Ario NAKAMURA, Shinya HASHIMOTO and Haruhiko MOTOHASHI

JAERI-RIKEN SPring-8 Project Team
2-28-8 Honkomagome, Bunkyo-ku, Tokyo

(Received October 1, 1994)

Through calculation of temperature distribution and thermal deformation of monochromators, optical degradation by the heat loads in SPring-8 have been discussed. Cooling experiments were made on three models of copper structures with the JAERI Electron Beam Irradiation Stand (JEBIS) and the results were used to estimate heat transfer coefficients in the models. The heat transfer coefficients have been adopted to simulate heating processes on silicon models of the same structures as the copper models, for which radiations from the SPring-8 bending magnet and the JAERI prototype undulator (WPH-33J) were considered. It has been concluded that, in the case of bending magnet (with power density of $0.27[\text{MW}/\text{m}^2]$ on monochromator surface), the temperature at the surface center reaches about $30[\text{°C}]$ from the initial temperature of $27[\text{°C}]$ in all the models. In the case of WPH-33J (with power density of $8.2[\text{MW}/\text{m}^2]$), the temperature reaches about 200 to $280[\text{°C}]$ depending on the models. The radiation from WPH-33J yields slope errors bigger than the Darwin's width($23[\mu\text{rad}]$).

Keywords: SR, Monochromator, Heat Load, Water-cooling, Thermal Deformation,
Calculation, SPring-8

目 次

1. 序 論	1
2. 種々の水路形状における熱伝達率の実験的導出	2
3. SPring-8シリコンモノクロメータ結晶の熱解析	7
4. 考 察	12
謝 辞	16
参考文献	16
付録 1 SPring-8の放射光源とフォトンパワー	17
付録 2 解析コードANSYS の使用	20
付録 3 熱伝達率の計算（水を冷媒とした場合）	26

Contents

1. Introduction	1
2. Experimental Evaluation of Heat Transfer Coefficients for Various Channels	2
3. Simulation of the Heating Processes on Silicon Monochromators for SPring-8	7
4. Conclusion and Discussion	12
Acknowledgement	16
References	16
Appendix 1 SPring-8 Radiation Sources and Their Photon Power	17
Appendix 2 How to Use ANSYS	20
Appendix 3 Calculation for Heat Transfer Coefficients (Coolant is Water)	26

1. 序 論

SPring-8 で使用する光学素子は、高輝度かつ高強度の放射光に照射されるため、熱変形を起こして光学的性能が低下する。光学素子の熱負荷による機械的影響を定量的に知っておくことは、ビームラインの設計に必要不可欠である。

分光結晶の冷却特性は、結晶の形状、熱伝導率、結晶と冷媒間の熱伝達率によって決定される。形状や熱伝導率は明確に定義できる量であるが、熱伝達率は冷媒の物性値のほかに、水路形状や流速等の複雑な流体条件によって決定される。冷媒は高い冷却能力が期待される乱流、しかも未発達流状態で使うことが有効と考えられるが、そのような場合の熱伝達率を理論的に求めようとすると複雑な流体運動の解析が必要となり、計算機シミュレーションの際に必ず導入しなければならない境界条件の単純化等によって大きな誤差が発生する可能性がある。したがって、理論的な解析のみに頼ることは危険であり、実際に加熱、冷却を行い、実験データに基づいた解析を行うことが必要不可欠となる。

われわれは、JEBIS（原研プラズマ電子銃）高熱負荷試験装置を使用し、種々の冷却水路形状を持つ銅試験体を用いて水を冷媒とした冷却特性を実験的に求めた^[1]。本書では、それらの実験的結果を基に、有限要素解析コード ANSYS を用いて行った以下の熱解析について報告する。

- (1) 銅試験体を用いた実験を計算シミュレートすることにより、各試験体と水との間の熱伝達率を求める。
- (2) 素材をシリコンに置き換え、求めた熱伝達率を用いて、SPring-8 のビームラインでの分光結晶の温度上昇と熱変形を計算する。光源としては、偏向電磁石^[2]とアンジュレーター^[3]を想定する。付録 1 にその仕様を記述する。

2. 種々の水路形状における熱伝達率の実験的導出

ある水路形状の冷却特性を知ることができれば、その形状からのわずかな変化に伴う冷却効率や強度の変動は摂動的に扱うことができ、必要に応じて、計算機実験で最適化を行うこともできる。しかし、水路形状の極端に異なる系については、その熱伝達率の導出は理論計算のみでは追従できない。この点を念頭において、異なる3種の水路形状を実験及び解析の対象としてとりあげた。

熱伝達率は、冷却水路形状と冷媒の物性値には依存しても、試験体の素材（熱伝導率の違い）には直接影響されない。よって、加工しやすく、熱伝導率の高い銅を用いて実験を行い、熱伝達率を導出する。その後、その熱伝達率をシリコン試験体の冷却状態のシミュレーションに使用する。本章では実験方法の簡単な説明をし、図1の流れ図に沿って行った種々の冷却水路形状に対する熱伝達率の決定について述べる。

2.1 銅試験体の熱負荷実験

図2に熱負荷実験に用いた銅試験体の構造を示す。 $\phi 0.5$ [mm] の非接地型シーズ熱電対（アルメル－クロメル）を、その先端が試験体中心の表面から深さ 0.3 [mm] の位置にくるように、銀口ウ付けで埋め込んでいる。銅と銀の熱伝導率はそれぞれ 401, 428 [W/(m·°C)] と近い値であるため、熱電対の固定に用いた銀口ウ部の熱伝導率の違いは無視でき、試験体全体を一様な銅材と考えることができる。

3種の形状のうち、図2 a) の粗フィン付凹板は、類似した形状についての冷却特性が KEK (PF), APS 等でも試験されている^[4,5]。図2 b) の細フィン付板は、粗フィン付凹板よりも冷却効率が高いという予想のもとに採用した。粗フィン付凹板と細フィン付板には、分光器内に設置する際にフィン底面が固定しにくいという問題がある。図2 c) のマイクロパイプ付板は、底面固定を容易にし、かつ、素子全体の剛性を高めるための試みである。また、各水路形状における「冷却水路から素子表面までの距離」は粗フィン付凹板 : 1.5 [mm]、細フィン付板 : 0.8 [mm]、マイクロパイプ付板 : 0.5 [mm] と変えてあるが、これは、熱伝達率測定には直接的な関連はない。シリコン素材の加工限界を調査するために、同形状のシリコンレプリカを作成した経緯があり、それらの値をそのまま銅試験体に採用したものである。

熱負荷装置としては電子照射加熱装置 JEBIS を使用し、試験体表面の $\phi 20$ [mm] の円形の領域を一様の熱流束で加熱した。図3は加熱過程を示すグラフである。ここで、到達温度の時間変化にピークが存在することについて説明を加えなければならない。これは、JEBIS のアーク電流が照射開始から時間とともにわずかに減衰していき、照射パワーがそれに伴って減衰するためである。図3のアーク電流の傾斜にそれを見ることができる。もちろん、アーク電流とパワーの間には、校正実験が行われ、時々刻々の入射パワーは正確に決定できる。ここでは、温度カーブのピーク位置での入射パワーが照射開始時のものとほとんど同じであると考えて解析を実行した。

以下では、照射開始時の熱流束を Q_e 、最大到達温度を dT と記すことにする。冷却水の流速が 3 [m/s] におけるそれらの実験データ（表1）をもとに、熱伝達率の導出を行うこととした。

表 1 JEBIS による熱負荷試験結果（抜粋）

(冷却水流速 3 [m/s]、温度測定点は試験体中心の表面より深さ 0.3 [mm])

銅試験体名	熱流束 Q_e [MW/m ²]	上昇温度 ΔT [°C]
粗フィン付凹板	2.7	36
	6.7	78
細フィン付板	2.1	33
	5.0	69
マイクロパイプ付板	2.0	38
	5.2	90

2.2 热解析コード(ANSYS)用解析モデル

今回の解析には、有限要素法解析コード ANSYS を使用した。ANSYS の詳細、ハードウェア構成は付録 2 にまとめた。ここでは、熱伝達率の導出に使用した解析モデルについて述べる。図 4 に要素分割した 3 種類の解析モデルを示す。解析モデルは銅試験体の形状を再現しており、これらのモデルは 3 章においてシリコンを想定した解析にも用いる。座標軸の設定にあたっては、Z=0 面を試料面(照射面)とした。計算要素形状としては 3 次元 6 面体 8 節点 (ANSYS STIF70、SOLID45) を採用した。直線の交点が節点(計算点)を意味する。全モデルとも各銅試験体の対称性に基づいて 1/4 部分をモデル化しており、「→」で示した原点が試験体表面中心である。

図 4 a) 粗フィン付凹板は、松木ら^[6]が報告したフィン付凹板である(本報告では他試験体との区別を明確にするため、フィン付凹板を粗フィン付凹板と呼ぶ)。図 4 b) 細フィン付板の解析モデルは、実物である図 2 (b) とは冷却水流入口の母体部形状が若干異なっている(X-Z 平面で見ると、解析モデルでは矩形をしているが、実物は角を丸めてあり蒲鉾形に近い)。これは解析モデル構成時の便宜をはかったため、異なる部分は熱入力中心である原点から離れているので、熱解析上の問題はない。図 4 c) マイクロパイプ付板では、素子表面から数えて一層目の冷却水路周辺で節点密度を増し、その付近で詳細な解析が行なえるようにした。各解析モデルの計算節点数はそれぞれ、粗フィン付凹板が 11144 点、細フィン付板 9981 点、マイクロパイプ付板 10470 点である。

熱的な束縛条件としては、照射面と冷却面以外は全て断熱とした。本解析の温度域では、輻射による冷却は無視して良いためである。また、冷却水の物性値は温度によらず一定とし、沸騰は起こらないものとした。応力解析における束縛条件は 3.3 で詳細に述べる。

2.3 热伝達率の導出

冷媒の流れ、温度の状態は場所によって変わるために、熱伝達率は厳密には冷却水路面の場所の関数になる。冷却水路面において、試験体から冷媒に伝達する局所的な熱流束 q [W/m²] は、接触面における試験

体の温度とそこから充分離れた位置における冷媒の温度との差 ΔT に比例し $q = h \Delta T$ で表される。この比例定数 h [W/(m²·°C)] が、冷媒の物性値、流速、水路形状等の条件で決定される局所熱伝達率である。今回の解析では、場所による依存性を平均して、冷却水路面全体で熱伝達率を一定とした平均熱伝達率 H [W/(m²·°C)] を、熱伝達率として解析を進めることにした。

熱伝達率 H [W/(m²·°C)] を求めた具体的方法としては、入力する熱流束 Q_e を一定にして H と上昇温度 dT の関係を熱解析によって求めた後、 dT が実験結果に一致するような H を実際の熱伝達率と決定した。ここで行った解析では、 Q_e として 4.0 [MW/m²] (これは照射実験での熱入力値群の平均値である) を選んだ。

熱負荷実験から得られた Q_e と dT は、表 1 に示した通りであり、これらをプロットしたものが図 5 である。厳密に言えば、冷媒温度はオフセットから若干上昇するので、それに依存して熱伝達率も変化する。しかし、図 5 の dT と Q_e の関係がほぼ線形であることから、実験の冷媒温度範囲では熱伝達率がほとんど変化しないことがわかる。

図 5 の直線から $Q_e = 4.0$ [MW/m²] のときの dT を読みとると、それぞれ、

粗フィン付凹板	: 48 [°C]
細フィン付板	: 57
マイクロパイプ付板	: 70

である。解析にあたっては以下のように解析モデルを設定した。

各解析モデル表面中心 ← JEBIS での照射と等価の熱量 ($Q_e = 4.0$ [MW/m²], $\phi 20$ [mm])
 冷却水路面全体 ← 一様の熱伝達率 H
 解析モデル熱伝導率 ← 銅の熱伝導率 (表 3 参照: 実験結果の温度域では、銅の熱伝導率はほとんど変化しないので、27 [°C] における値を採用した。)

ANSYS を用いて、試験体中心の表面から深さ 0.3 [mm] の位置での上昇温度を、 H を変数として計算した。結果を 図 6 に示す。この図において、 dT が実現される H は、それぞれ、

粗フィン付凹板	: 35×10^3 [W/(m ² ·°C)]
細フィン付板	: 8.5×10^3
マイクロパイプ付板	: 14×10^3

のように読みとることができる。これらを本解析における熱伝達率と決定した。

2.4 得られた熱伝達率についての検討

ここでは、付録3で述べる熱伝達率の現象論的式を用いて熱伝達率の算出を行い、今回求めた実験的な熱伝達率との比較検討を行う。

(1) 粗フィン付凹板

粗フィン付凹板は $Y = 0$ 断面の水路形状が蒲鉾形なので、ここでは凹形を無視して解析モデルの冷却水路断面積が最大となる中心位置の矩形断面をもつ直線水路を仮定し、計算位置を $x = 1.5 \times 10^{-2}$ [m] として局所熱伝達率を計算した。

遠方の冷却水流速	$V = 3.0$ [m/s]
冷却水路断面積	$S = 9.5 \times 10^{-6}$ [m ²]
冷却水路周長	$L = 0.021$ [m]
(A3-1) 式より 相当直径	$de = 4 \times S / L = 1.81 \times 10^{-3}$ [m]
(A3-2) 式よりレイノルズ数	$Re = V \times de / \nu = 6336 > 2300 \rightarrow$ 乱流である。
(A3-12) 式より 助走区間	$le = 12 \times de = 2.17 \times 10^{-2}$ [m] > $x \rightarrow$ 未発達流である。
(A3-14) 式より ヌセルト数	$Nu = 59.8$
(A3-3) 式より 熱伝達率	$H = 20.2 \times 10^3$ [W/(m ² ·°C)]

この結果は、実験より得られた熱伝達率 35×10^3 [W/(m²·°C)] に比べて小さい値となっている。現象論的式による結果が実際よりも小さい値となった理由は、蒲鉾形水路形状を無視した点にあると考えられる。

(2) 細フィン付板

細フィン付板も粗フィン付凹板と同様の計算が可能である。(1)式において、相当直径の数値を以下のように変更して算出する。ここでも解析モデルの冷却水路断面積が最大となる位置、すなわち 計算位置を $x = 1.5 \times 10^{-2}$ [m] として、局所熱伝達率を計算した。

遠方の冷却水流速	$V = 3.0$ [m/s]
冷却水路断面積	$S = 2.8 \times 10^{-6}$ [m ²]
冷却水路周長	$L = 0.015$ [m]
(A3-1) 式より	相当直径 $de = 4 \times S / L$ [m] = 7.47×10^{-4} [m]
(A3-2) 式よりレイノルズ数	$Re = V \times de / \nu = 2615 > 2300 \rightarrow$ 乱流である。
(A3-12) 式より 助走区間	$le = 12 \times de = 8.96 \times 10^{-3}$ [m] < $x \rightarrow$ 発達流である。
(A3-14) 式より ヌセルト数	$Nu = 17.6$
(A3-3) 式より 熱伝達率	$H = 14.4 \times 10^3$ [W/(m ² ·°C)]

この結果は、実験より得られた熱伝達率 8.5×10^3 [W/(m²·°C)] に比べてかなり大きい値になっており、このような狭いフィン幅においては、相当直径の概念は適用できないことがわかる。相当直径の概念では、細フィン付板は直径 7.47×10^{-4} [m] の円管状水路に近似される。しかし、実際は幅 4.0×10^{-4} [m]、深さ 70.0×10^{-4} [m] の狭間を冷媒が流れるのであり、両者の流体条件(乱流、層流)はかなり異なるものであることが示唆される。

(3) マイクロパイプ付板

マイクロパイプ付板の熱伝達率については、(1)式において、 de を管状水路の直径として計算すればよい。計算位置を $x = 1.50 \times 10^{-2} [m]$ として、局所熱伝達率を計算した。

遠方の冷却水流速	$V = 3.0 [m/s]$
管状水路の直径	$de = 1.5 \times 10^{-3} [m]$
冷却水路断面積	$S = 1.8 \times 10^{-6} [m^2]$
(A3-2) 式よりレイノルズ数	$Re = V \times de / \nu = 5250 > 2300 \rightarrow$ 乱流である。
(A3-12) 式より 助走区間	$le = 12 \times de = 1.8 \times 10^{-2} [m] > x \rightarrow$ 未発達流である。
(A3-13) 式と(A3-14)式より	ヌセルト数 $Nu = 48.4$
(A3-3) 式より 热伝達率	$H = 19.7 \times 10^3 [W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$

この結果は、実験より得られた熱伝達率 $14.0 \times 10^3 [W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$ に比べて大きな値となっているが、その差は比較的小さい。これは、マイクロパイプ付板の管状水路が円形断面を持っているために、より理想に近い条件で比較ができたためであろう。表 2 にこれらの熱伝達率をまとめた。

表 2 今回導出した熱伝達率

	現象論的式による熱伝達率 [W/(m ² ・°C)]	実験及び熱解析による熱伝達率 [W/(m ² ・°C)]
粗フィン付凹板	20.2×10^3	35×10^3
細フィン付板	14.4×10^3	8.5×10^3
マイクロパイプ付板	19.7×10^3	14×10^3

3. SPring-8シリコンモノクロメータ結晶の熱解析

本章では、SPring-8 ビームラインのモノクロメーター第 1 結晶として、第 2 章の各解析モデルと同構造のシリコン結晶を用いた場合の温度上昇および熱変形の解析について述べる。図 7 に解析の手順を示した。

3.1 热伝達率のシリコンへの応用

第 2 章でも触れたとおり、銅試験体の条件で求めた熱伝達率はシリコンにも適用できる。解析モデルの素材の変更に伴い、変えなければならない解析上の物性値は、熱伝導率、ヤング率、熱膨張係数、ボアソン比である。今回の解析に用いたシリコンの物性値を表 3 にまとめておく（参考のため、銅についても挙げておく）。また、試料面（解析モデル上の $Z=0$ ）と結晶面（111）が一致しているものとした。

ところで、松木ら⁽⁹⁾の計算によると、アンジュレーターの場合は温度が 100 [°C] を越えることが判明している。0 ~ 150 [°C] 間では、シリコンの熱伝導率は 170~100 [W/(m·°C)] と変化するので、解析モデル全体にある一定温度の物性値を貼り付けるのは、正確ではない。そこで、今回は温度解析と応力解析への影響が大きい熱伝導率と熱膨張係数について、温度依存性を導入した。シリコンにおける温度-熱伝導率曲線と温度-熱膨張係数曲線とを表 3a に示すように線形近似して、解析モデルに入力した。このような温度依存性についての収束計算は解析コードによって自動的に行われる。なお、銅試験体を解析にあたっては、銅の熱伝導率が実験における温度範囲内ではほとんど変化しないため、温度依存性は考慮せずに 27 [°C] における物性値のみを入力した。

表 3 a シリコンの物性値

温度 [°C]	0	27	127	227	327
熱伝導率 [W/(m·°C)]	168	148	98.9	76.2	61.9
熱膨張係数 $\times 10^6$ [°C ⁻¹]	2.5	2.7	3.2	3.5	3.7
弾性率 [N/m ²]	13.0×10^{10}	—	—	—	—
ボアソン比（等方材料）	0.278	—	—	—	—
素子面の結晶学的性質	// (111)	—	—	—	—

表 3 b 銅の物性値

温度 [°C]	27
熱伝導率 [W/(m·°C)]	401
熱膨張係数 $\times 10^6$ [°C ⁻¹]	16.7
弾性率 [N/m ²]	12.6×10^{10}
ボアソン比（等方材料）	0.370
素子面の結晶学的性質	多結晶

3.2 結晶が受ける熱流束

SPring-8 で利用される光源として考えられるものには、アンジュレーター、ウィグラーおよび偏向電磁石がある。ここでは将来、SPring-8 で光源として主として採用されるであろうアンジュレーターと偏向電磁石をとりあげ、両者の検討を行うこととする。アンジュレーターとしては、現在われわれが保有しているプロトタイプアンジュレーター^[3]をとりあげた。

結晶に照射される放射光は、結晶により一部は反射、散乱、透過し、残りが結晶内部で吸収されて熱となる。今回は素材としてシリコンを選び、その素子表面において放射光が熱に変換されるものとした。また、照射される放射光が全て熱に変換されると仮定し、実際より厳しい条件とした。解析モデルへの照射は、放射光進行方向と水路方向を一致させる配置で行った。すなわち、解析モデル上でいえば、X 軸が放射光に対してほぼ並行方向、Y 軸が放射光に対して垂直方向である。光源から見れば、垂直方向の熱流束分布が X 軸方向に射影され、水平方向の熱流束分布が Y 軸方向に映される。この概念図を図 8 に示す。結晶面（シリコン表面 // (111)）は、12 [keV] の X 線の利用を想定してプラグ角 0.16 [rad] (9.2 [deg]) の傾斜をもたせた。以上のパラメーターについては、付録 1 においてまとめておいた。また、偏向電磁石で、放射光方向に対して垂直な方向の熱分布の広がりを片側 10 [mm] に切ったのは、解析モデルにおいて、スリットを入れた際のビームエッヂを再現するためである。実機では、両側合計 20 [mm] 幅の偏向電磁石光が素子表面を照射することに相当する。シリコンモノクロメータ結晶が受ける熱流束の性質を表 4 に示した。

これらの熱流束分布データを解析モデルの素子表面上に入力するのだが、素子表面は計算要素によって長方形格子状に分割されているので、入力データをその格子に合わせて分割、調整する必要があった。本解析では特に、入熱総量と中心熱流束の再現に注意しながら入力データを調整した。

表 4 素子表面上での熱流束の性質

結晶は、プラグ角 0.16 [rad] の傾斜をもたせた。

Y：放射光に対して垂直方向，X：放射光に対してほぼ並行方向

	偏向電磁石	アンジュレーター (WPH-33J)
光源からの距離 [m]	30	40
実機の入熱総量 [W]	97 (20mm 幅分)	850
中心熱流束 [MW/m ²]	0.27	8.1
熱流束の広がり(片側)	熱分布一様 (Y)	1.7 (Y) ^{注)}
σ' [mm]	12.0 (X)	7.9 (X) ^{注)}
分布の形状	ガウス分布近似	ガウス分布近似

注) 一次光 (12 [keV]) の σ' を示す。

3.3 応力解析における束縛条件

熱応力解析を行う場合には、解析モデルの周囲に束縛条件を与える必要がある。素子表面以外の面の固定の仕方によって異なる変形が予想される。事実、松木らの計算結果^[4]によれば、面の固定によって変形を抑制できることが判明している。

粗フィン付凹板と細フィン付板では、照射領域の周辺には低温部分が存在し、剛体的に取り囲んでいることから、側面は完全固定として扱うことができる。しかし底面については、側面のような剛体部分が存在しないので、自由端とした条件を施して応力解析を行うことになる。われわれはさらに、将来何らかの方法で底面が固定できることを想定して、側面底面両方を完全固定した場合についても応力解析を行った。マイクロパイプ付板では底部に剛体的な部分を残しておくことができることと、底面の固定が容易なことから、側面底面固定についてのみ計算を行った。また、前述したように、今回の解析モデルは 1/4 モデルを採用しているため、2 つの対称面 ($X=0$ の面, $Y=0$ の面) 上では、面に垂直な方向の変形は 0 とおくことができる。図 9 に側面固定、底面固定、対称境界面固定等の応力束縛条件を概念的に図示する。

3.4 解析ルーチンファイル

解析モデルに、上で述べたシリコン単結晶の物性値、光源の性質、束縛条件を与えて、解析ルーチンファイルを作成し、これに基づいて熱応力解析を行った。表 5 に光源と束縛条件の組合せを整理し、便宜上各解析条件のファイル名称を付す。ファイルの詳細については、付録 2 に述べてある。

表 5 解析条件ファイルの名称

解析モデル名	光源・ファイル名	束縛固定条件とファイル名
粗フィン付凹板	偏向電磁石 bmnfh5.dat	側面・底面 nfb.dat
		側面 nfb.dat
	アンジュレータ unnfh5.dat	側面・底面 nfb.dat
		側面 nfb.dat
細フィン付板	偏向電磁石 bmmfh5.dat	側面・底面 mfb.dat
		側面 mfb.dat
	アンジュレータ unmfh5.dat	側面・底面 mfb.dat
		側面 mfb.dat
マイクロパイプ付板	偏向電磁石 bmmpf5.dat	側面・底面 mpfb.dat
	アンジュレータ unmpf5.dat	側面・底面 mpfb.dat

3.5 温度分布

ここでは解析の便宜上、冷却水温度を一様に 27 [°C] と設定して熱解析を行った。ここで言う温度とは、最終的に熱平衡に達した時点での到達温度を意味する。図 10-12 に温度分布を示す。記号「// X 軸」は、X 軸上の節点における温度を意味する。Y, Z についても同様である。横軸は照射中心すなわち原点からの距離 [mm]、縦軸はその距離での温度である（スケールは、偏向電磁石とアンジュレーターとで変えていることに注意）。

図 13 に、各解析条件における最大温度をまとめた。最大温度値は、偏向電磁石では 30 [°C] 程度と低く、アンジュレーターでは 200 [°C] 以上と高くなっている。両者の最大熱流束の違いが反映した結果となった。図 10-12 を見ると、同じ光源では、グラフの形状や拡がり等は水路形状にほとんど依存せず、ピーク値だけが異なっていることがわかる。これは、素子表面に沿った方向（X, Y 軸方向）と深さ方向（Z 軸方向）の熱伝導量の割合が似かよっていることを示している。

3.6 素子表面の変位量（Z 軸方向）とうねり角

熱負荷を受けた素子表面は、膨張して盛り上がり、うねりを生じる。うねりの各所における傾斜をうねり角（slope error）と表現し、その計算方法を図 14 に示す。ここでは、プラグ条件に影響しない X, Y 軸方向の変形は無視して $\Delta X_1 = \Delta X_2 = \Delta Y_1 = \Delta Y_2 = 0$ として扱い、Z 軸方向の変形のみを変位量として扱うこととした。数値計算の観点からも、今回の解析モデルでは「X, Y 軸方向変位量 \ll X, Y 軸方向節点間距離」であるため、X, Y 軸方向の変形は無視した。X 軸上の点 A ($X_1, 0$), B ($X_2, 0$) が、変形後に点 A' ($X_1 + \Delta X_1, \Delta Z_1$), B' ($X_2 + \Delta X_2, \Delta Z_2$) に移動したとすると、本解析におけるうねり角は [B' 点での X 方向うねり角] = $(\Delta Z_2 - \Delta Z_1) / (X_2 - X_1)$ と表すことができる。本書では、これを「// X 軸うねり角」（解析モデル上の X-Z 平面内におけるうねり角）と表現する。Y 軸上の点についても同様に計算し、「// Y 軸うねり角」と表現する。

この計算を X 軸上および Y 軸上の節点について行った。図 15-17 に X 軸、Y 軸上の変位量とうねり角を示す。粗フィン付凹板、細フィン付板のグラフについては似かよった形状だが、マイクロパイプ付板の「// Y 軸」については凹凸を呈しており、冷却水路の位置が多大に影響していることがわかる。

各解析条件における最大変位量を図 18 に、各解析条件における最大うねり角を図 19 にまとめた。底面を固定することによって、素子表面の変位をおよそ 50 % に抑える効果がある。うねり角においては、「// X 軸」方向で 50 % に、「// Y 軸」方向で 80 % に抑える効果がある。また、底面固定の有無による変位量の変化をみると、変形が素子表面近傍のみではなく、モデル全体で起きていることがわかる。これはいわゆる bowing と呼ばれる性質である。

3.7 格子定数の変化率 (Z 軸方向)

素子表面における Z 軸方向 (散乱ベクトル方向) の格子面間隔の変化は、素子の光学的性能に関わる重要なパラメータである。これを格子定数の変化率 (Z 軸方向) と表現し、図 20 に計算方法を示す。今回は、解析モデルの素子表面の第一層目 (表面から数えて 1, 2 番目の節点に挟まれている部分) について行い、「Z 軸方向変位量 / 変形前 Z 軸方向長」で計算する。これも、X, Y 軸方向の変形は無視し、 $X_1 = \Delta X_2 = \Delta Y_1 = \Delta Y_2 = 0$ として扱った。例えば、素子表面上の節点 A ($X_1, 0$) および A のすぐ下の節点 B (X_2, Z_2) : $X_1 = X_2$ が、変形後に $A' (X_1 + \Delta X_1, \Delta Z_1)$, $B' (X_2 + \Delta X_2, Z_2 + \Delta Z_2)$ に移動したとすると、格子定数の変化率 (Z 軸方向) は $[A' \text{ 点での格子定数の変化率 (Z 軸方向)}] = (\Delta Z_1 - \Delta Z_2) / (0 - Z_2)$ と示すことができる。この計算を X 軸上および Y 軸上に存在する節点について行った。図 21-23 に計算結果を示す。

図 24 に各解析条件における最大変化率をまとめた。側面、底面固定に比べると側面固定のみの方が変化率が小さくなっている。これは、底面を固定されていないぶん熱応力が素子全体に分散するので、素子表面近傍に集中しなくなるためと考えられる。この点を除くと、図 13 の最大温度とほとんど比例しており、格子定数の変化は構造強度にそれほど依存しないことがわかる。

3.8 熱応力解析結果のまとめ

表 6 に、今回の解析で得られた温度、変位量、うねり角、変化率の最大値をまとめた。

表 6 本解析における各最大値 (水温 27 [°C])

解析 モデル名	光源	束縛条件	温度 [°C]	変形量 $10^{-2} [\mu\text{m}]$	$\parallel X \text{ 軸うねり角} [\mu\text{rad}]$	$\parallel Y \text{ 軸うねり角} [\mu\text{rad}]$	$Z \text{ 軸方向変形率 } 10^{-5}$
粗フィン付凹板	偏向電磁石	側面底面固定	33	5.4	2.6	10.1	2.6
		側面固定	33	12.7	6.5	17.9	2.5
細フィン付板	偏向電磁石	側面底面固定	215	144	88	356	88
		側面固定	215	282	167	476	86
マイクロパイプ付板	偏向電磁石	側面底面固定	34	5.6	4.2	11.5	2.8
		側面固定	34	19.0	11.2	29	2.6
	アンジュレータ	側面底面固定	245	159	100	422	101
		側面固定	245	359	213	532	99
	アンジュレータ	側面底面固定	281	181	120	609	130

4. 考 察

4.1 構造強度

素子表面の変位量は素子全体の変形に起因するため、素子表面近傍の温度上昇 $1 [^{\circ}\text{C}]$ あたりの変位量は素子全体の構造強度の目安となる。アンジュレーターの場合、「最大変位量／最大温度」を計算してみると、以下のようなになる。底面固定の有無で変位は大きく異なる。マイクロパイプ付板は変形が小さく、最も強固な構造であることがわかるが、その差違は小さく、底面固定した粗フィン付凹板と細フィン付板とほとんど変わらない。

粗フィン付凹板（側面、底面固定）	$144\text{e-}2 / (215-27) = 7.7\text{e-}3$
粗フィン付凹板（側面固定）	$282\text{e-}2 / (215-27) = 15.0\text{e-}3$
細フィン付板（側面、底面固定）	$159\text{e-}2 / (245-27) = 7.3\text{e-}3$
細フィン付板（側面固定）	$359\text{e-}2 / (245-27) = 16.5\text{e-}3$
マイクロパイプ付板	$181\text{e-}2 / (281-27) = 7.1\text{e-}3$

図 19 の各解析条件における最大うねり角を見ると、全ての解析モデルにおいて「//Y軸」のうねり角が大きく、水路と直交する方向にうねり易いことがわかる。同じフィン形状でも、細フィン付板は粗フィン付凹板とは異なる性質を持っていることがわかる。マイクロパイプ付板では「//Y軸」変位量およびうねり角が水路位置に応じて凹凸を呈しており、水路位置が素子表面の変形に影響していることがわかる。粗フィン付凹板や細フィン付板でこの現象が見られない点に注目すると、原因のひとつとして「水路から素子表面までの距離」が $0.5 [\text{mm}]$ では不十分で、素子表面付近の強度が脆弱になっているものと考えられる。

4.2 光学的誤差

分光後の光学的誤差の主な原因としては、素子表面のうねりと、素子表面近傍での格子定数の変化が挙げられる。本来、この 2 つは同時に発生して光学的誤差をもたらすが、ここでは、両者の寄与を分けて議論する。また、3.1 に述べたとおり、試料面（解析モデル上の $Z=0$ ）と結晶面（111）が一致している。

(1) うねり角について

分光結晶の性能を表すパラメーターのひとつとしてダーウィン幅があり、うねり角をどんなに小さくしてもダーウィン幅分の分解能誤差は必ず発生する。したがって目安として、うねり角はダーウィン幅以下に抑えられていれば問題ないと考えられる。また、ブレググ角の誤差に関するのは、放射光進行方向と散乱ベクトル方向を含む面内（解析モデル上の X-Z 平面）のうねり角なので、「//X軸うねり角」についてダーウィン幅との比較を行えば良い。 $12 [\text{keV}]$ の X 線の利用を想定すると、素子表面における $12 [\text{keV}]$ フォトン密度の放射光方向分散（解析モデル上では X 軸方向分散）は、偏向電磁石で片側 $9.8 [\text{mm}]$ 、アンジュレータで片側 $2.5 [\text{mm}]$ であり、この範囲内に $12 [\text{keV}]$ のフォトンの 68% が集中している。そこで、この範囲内での最大うねり角を、 $12 [\text{keV}]$ の X 線に対するシリコン（111）のダーウィ

ン幅 (= 23 [μrad]) と比較することで、光学的誤差が検討できる。

表7に、X = 0~9.8 (偏向電磁石) , 0~2.5 (アンジュレーター) [mm] での最大「うねり角 // X 軸」を示す。偏向電磁石については、いずれのケースもダーウィン幅をはるかに下回っており、入射する 12 [keV] 放射光の 68 % を、ダーウィン幅と同等の精度で分光できる。また、図 15-17 をみると放射光と垂直方向 (すなわち Y 軸方向) については、Y = 10 [mm] 位置にビームエッジによる温度勾配が発生し、最大うねり角が発生しているが、いずれも 10 [μrad] 以下の値であり、こちらも精度上の問題はない。アンジュレーターについては、粗フィン付凹板の側面底面固定以外のケースでは、ダーウィン幅以上の誤差がうねり角によって発生することがわかる。

表7 X = 0~9.8, 0~2.5 [mm] での最大「// X 軸うねり角」

解析モデル名	束縛条件	偏向電磁石 X = 0~9.8 [mm] における最大うねり角 [μrad]	アンジュレータ X = 0~2.5 [mm] における最大うねり角 [μrad]
粗フィン付 凹板	側面底面固定	2.6	20
	側面固定	6.0	40
細フィン付板	側面底面固定	4.2	38
	側面固定	11.2	75
マイクロパイプ付板	側面底面固定	4.8	50

(2) 格子定数の変化について

3.7 の格子定数の変化率 $\Delta d / d$ はエネルギー誤差へ換算すると、 $\Delta E / E = \Delta d / (\Delta d + d) = 1 / (1 + 1 / (\Delta d / d)) \sim \Delta d / d$ となり、そのままエネルギー誤差として扱って良い。前述のダーウィン幅 23 [μrad] は、エネルギー誤差 $\Delta E / E = \Delta \theta / \theta_{\text{bragg}} = 1.4 \times 10^{-4}$ に相当し、これだけのエネルギー誤差は必ず発生する。ところで、実際の分光器使用にあたっては、格子定数変化率がビームサイズ内で一様となっていれば、分光器光学系を調整することによってエネルギー誤差をキャンセルできる。つまり、実機使用を考えるならば、ビームサイズ内における格子定数変化率のはらつき（最大値-最小値）が 1.4×10^{-4} 以内に収まっているれば、分光器光学系の調整によってダーウィン幅相当のエネルギー誤差に収束できることになる。そこで、偏向電磁石では X = 0~9.8 (Y 軸方向は熱流束分布が一様なので検討しない) 、アンジュレーターでは X = 0~2.5 [mm] および Y = 0~0.7 [mm] のビームサイズ内に注目し、格子定数変化率のはらつきを読み取り、表8に示した。

いずれのケースにおいても全く問題は無い。格子定数変化率は、最大値を見る限りでは大きなエネルギー誤差が発生するのだが、適切な分光器光学系の調整により、ダーウィン幅相当のエネルギー誤差程度に収束することができる事になる。

表 8 格子定数変化率のばらつき（指定範囲での最大値－最小値）

解析モデル名	束縛条件	偏向電磁石 $X = 0 \sim 9.8$ [mm] における格子定数変化率のばらつき	アンジュレーター $X = 0 \sim 2.5$ [mm] における格子定数変化率のばらつき	アンジュレーター $Y = 0 \sim 0.7$ [mm] における格子定数変化率のばらつき
粗フィン付 凹板	側面底面固定	1.1×10^{-5}	3.1×10^{-5}	4.4×10^{-5}
	側面固定	1.1×10^{-5}	3.1×10^{-5}	3.1×10^{-5}
細フィン付板	側面底面固定	1.4×10^{-5}	3.8×10^{-5}	3.8×10^{-5}
	側面固定	1.3×10^{-5}	3.8×10^{-5}	4.4×10^{-5}
マイクロパイプ付板	側面底面固定	1.8×10^{-5}	6.3×10^{-5}	7.5×10^{-5}

4.3 まとめ

今回の解析により明らかになった点をまとめると、以下の 3 点となる。

- (1) アンジュレーターについての全てのケースで、最大温度は 300 [°C] 程度となる。水路表面における温度は水圧 5 気圧での水の沸点である ~ 150 [°C] を越えるおそれがあり、いわゆるバーンアウトが発生し、安定した冷却は困難となる。
- (2) ダーウィン幅とうねり角とを比較検討した結果、偏向電磁石についてはうねり角は充分小さく、問題なし。アンジュレーターについては、粗フィン付凹板の側面底面固定以外のケースでは、ダーウィン幅以上のうねり角が発生する。
- (3) ダーウィン幅と、格子定数変化による回折角変化とを比較検討した結果、格子定数変化によるエネルギー誤差は、適切な分光器光学系の調整によってダーウィン幅相当に収束することができる程度である。

今後の実機製作に向けての対策として、以下のようなものが考えられる。

- ①水路形状の各寸法を最適化し、熱伝達関連の冷却能力を向上させる。
- ②斜入射配置で熱流束を減少させる。
- ③「水路から素子表面までの距離」を最適化し、熱伝導関連の冷却能力を向上させる。
- ④固定法を最適化し、熱変形関連の性能を向上させる。

ただし、今回のアンジュレーターのように極端に大きな温度上昇が起こる場合には、①のような熱伝達率の向上は有効ではない。①の効果を本解析結果から推測すると、冷却能力は 1~2 割程しか見込めないだろう。それに対して、②は熱流束そのものを下げる処置で、かなり期待される。inclined 配置で照射面積を増す方法はそのひとつの例⁷⁾である。③の距離は水路形状（水路幅、水路間隔、水路方向断面形状）によって異なり、最適化の際は水路面温度とうねり角に注意する必要がある。今回の熱応力変形解析結果によると、 ~ 1 [mm] 以下にした場合には水路の凹凸が現れる危険性がある。

④の一般的な方法としては、底面は完全固定、側面を自由にするなど、素子の応力的束縛条件を調整することで、素子表面のうねりを抑制する方法が考えられる。また、水路方向のうねりは発生しにくいので、水路方向//放射光方向となるような光学素子配置とするのがよい。

以上、全ての水路形状における一般事項を述べたが、各々の水路形状についてもそれぞれ改良点が考えられる。フィン型水路形状については、今回の粗フィン付凹板と細フィン付板との比較から、フィン密度が高いと構造強度が低下することがわかったので、フィン密度についての最適化が必要である。マイクロパイプ型は、水路配置を碁盤配列にする、素子表面近傍のみに水路を配置する、などの改良で剛性を向上できると考えられる。いずれも、冷却能力との兼ね合いも考えながら、形状の改良を進めねばならないだろう。また、今回の水路形状について優劣を比較すると、マイクロパイプ型の単位温度あたりの変位量が最も小さく、熱応力変形に対して最も強固な構造であるが、他形状と比べて大きな違いはない。したがって、フィン型（底面も固定したもの）とマイクロパイプ型のどちらが有望かは、本解析結果からは断言できない。

謝 辞

本実験および解析にあたっては、東京理科大の河村洋教授、平塚東氏、日本原子力研究所那珂研究所・核融合工学部 NBI 加熱研究室の秋葉真人氏、鈴木哲氏、横山堅二氏、同東海研究所・大型放射光施設開発室の佐々木茂美氏、その他の皆様から多大の便宜をはかっていただいた。ここに御礼を申し上げる。

参 考 文 献

- [1] 橋本眞也、本橋治彦、松木信雄、平塚東、大野英雄
"モノクロメータの高熱負荷試験", 日本放射光学会 pp.7-9 (1992.5.7) .
- [2] JAERI - RIKEN SPring-8 Project Team
"SPring-8 PROJECT PART1 FACILITY DESIGN 1991 [REVICED]"
- [3] Shigemi Sasaki, Nobuo Matuki, and Takeo Takeda
"SPring-8 prototype undulator", Rev. Sci. Instrum. 63 (1), (1992) .
- [4] T.Oversluizen, T.Matsushita, T.Ishikawa, P.M.Stefan, S.Sharma, and A.mikuni
"Performance of directly water-cooled silicon crystal for use in high-power synchrotron radiation applications", Rev. Sci. Instrm. 60 (7), (1989) .
- [5] Robert K. Smith
"Summary of Workshop on High Heat Load X-ray Optics", held at Argonne National Laboratory, Nucl. Instr. and Meth A291, 286-299 (1990) .
- [6] 松木信雄、橋本眞也、本橋治彦
"計算機シミュレーションによる直接水冷式分光結晶の熱解析", JAERI-M 93-021 (1993) .
- [7] A.T. Macrander , A.M. Khounsary and M. Graham
"SIMULATED HIGH HEAT LOAD PERFORMANCE OF AN INCLINED CRYSTAL MONOCHROMETER", Proc. Soc. of Photo-Optical Instr. Engr. , San Diego , CA (July 1992) .

謝 詞

本実験および解析にあたっては、東京理科大の河村洋教授、平塚東氏、日本原子力研究所那珂研究所・核融合工学部 NBI 加熱研究室の秋葉真人氏、鈴木哲氏、横山堅二氏、同東海研究所・大型放射光施設開発室の佐々木茂美氏、その他の皆様から多大の便宜をはかっていただいた。ここに御礼を申し上げる。

参 考 文 献

- [1] 橋本眞也、本橋治彦、松木信雄、平塚東、大野英雄
"モノクロメータの高熱負荷試験", 日本放射光学会 pp.7-9 (1992.5.7).
- [2] JAERI - RIKEN SPring-8 Project Team
"SPring-8 PROJECT PART1 FACILITY DESIGN 1991 [REVICED]"
- [3] Shigemi Sasaki, Nobuo Matuki, and Takeo Takeda
"SPring-8 prototype undulator", Rev. Sci. Instrum. 63 (1), (1992).
- [4] T.Oversluizen, T.Matsushita, T.Ishikawa, P.M.Stefan, S.Sharma, and A.mikuni
"Performance of directly water-cooled silicon crystal for use in high-power synchrotron radiation applications", Rev. Sci. Instrm. 60 (7), (1989).
- [5] Robert K. Smither
"Summary of Workshop on High Heat Load X-ray Optics", held at Argonne National Laboratory, Nucl. Instr. and Meth A291, 286-299 (1990).
- [6] 松木信雄、橋本眞也、本橋治彦
"計算機シミュレーションによる直接水冷式分光結晶の熱解析", JAERI-M 93-021 (1993).
- [7] A.T. Macrander , A.M. Khounsary and M. Graham
"SIMULATED HIGH HEAT LOAD PERFORMANCE OF AN INCLINED CRYSTAL MONOCHROMETER", Proc. Soc. of Photo-Optical Instr., San Diego, CA (July 1992).

付録1 SPring-8の放射光源とフォトンパワー

A1.1 計算に用いたビームライン

偏向電磁石およびプロトタイプ・アンジュレーター (WPH-33J)^[A1] のパラメータを表 A1 に示した。
アンジュレーターについては、計算に用いた設定条件を示した。

表 A1 光源のパラメータ

蓄積リング電子ビーム	
蓄積エネルギー [Gev]	8
蓄積電流 [mA]	100
偏向電磁石	
磁束密度 [T]	0.67
分散角 ^注 (垂直) [μrad]	64
最大パワー密度 [W/mrad ²]	1.48×10^3
全パワー [W] (2mrad分)	290
アンジュレーター	
長さ [m]	2
磁石周期長 [mm]	33
磁石周期数	61
Kパラメータ	1
分散角 ^注 (垂直) [μrad]	31.5
分散角 ^注 (水平) [μrad]	42.5
最大パワー密度 [W/mrad ²]	8.32×10^4
全パワー [W]	850

注：熱流束分布の分散角（片側）を示す。

A1.2 結晶が受ける熱流束

A1.2.1 結晶の傾き

結晶の傾斜角は、シリコン(111)を考慮して、結晶面間 $d = 0.314 [\text{nm}]$ のブレラグ角 $0.16 [\text{rad}]$ ($9.2 [\text{deg}]$) に設定した場合を論じる。これは波長 $\lambda = 0.1 [\text{nm}]$ ($12 [\text{keV}]$) のブレラグ角であり、WPH-33J を $K = 1$ で運転したときの基本波の波長に相当する。

A1.2.2 アンジュレータによる熱流束

アンジュレータビームラインでは、光源から遮蔽壁までの距離が $\sim 35 [\text{m}]$ であるため、分光結晶の位置を $40 [\text{m}]$ とする。SPRING-8 に挿入されたアンジュレータ WPH-33J について、 K パラメータと基本波のエネルギーとの関係を図 A1 に、 K パラメータと全放射熱量との関係を図 A2 に示す。WPH-33J を $K = 1$ で運転した場合の基本波のエネルギーは $12 [\text{keV}]$ になる。この基本波の波長 (K パラメータにより決定される) に対するブレラグ角 $0.16 [\text{rad}]$ ($9.2 [\text{deg}]$) に結晶表面を設定したとき結晶が受ける最大(光軸中心)の熱流束を図 A3 に示す。また、ブレラグ角 $0.16 [\text{rad}]$ ($9.2 [\text{deg}]$) だけ傾斜したシリコン(111) 分光結晶表面での分布を図 A4 に示す。横軸は結晶中心を通る座標軸に対応する。この傾斜表面上における熱流束分布は、中心で $8.2 [\text{MW/m}^2]$ 、放射光に対してほぼ並行方向(解析モデル上の X 軸方向)での分散幅 $7.9 [\text{mm}]$ 、放射光に対して垂直方向(解析モデル上の Y 軸方向)での分散幅 $1.7 [\text{mm}]$ であり、ガウス関数に近いものである。

A1.2.3 偏向電磁石による熱流束

偏向電磁石を光源としたビームラインでは、光源から遮蔽壁までの距離が $\sim 25 [\text{m}]$ であるため、分光結晶の位置を $30 [\text{m}]$ とした。図 A5 は、 $0.16 [\text{rad}]$ ($9.2 [\text{deg}]$) だけ傾斜した分光結晶表面上でのビームに沿った方向(解析モデル上の X 軸方向)の熱流束分布である。熱流束は、最大で $0.27 [\text{MW/m}^2]$ である。ビームに直交する方向(解析モデル上の Y 軸方向)では、放射光の性質から一様な分布である。SPRING-8 の偏向電磁石は水平面内 $2 [\text{mrad}]$ あたりの熱量が $290 [\text{W}]$ である。発光点での $2 [\text{mrad}]$ は、 $30 [\text{m}]$ 地点での $60 [\text{mm}]$ に相当する。今回の熱解析では、「偏向電磁石からの放射光は、素子直前で水平方向 $20 [\text{mm}]$ にマスクした」と考えているので、素子表面での入熱総量 = $290 [\text{W}] / 60 [\text{mm}] \times 20 [\text{mm}] = 97 [\text{W}]$ となる。

A1.3 利用 X 線の強度分布

分光結晶の光学的性質を評価する際には、使おうとする波長成分が、熱変形を受けた結晶表面のどの部分に最も高い密度で入射するかが問題となる。偏向電磁石を光源とした場合、 $12 [\text{keV}]$ のフォトンの縦方向の分散角 Σ_{BM} は、熱に関するパワーの広がりと同様に $1/(2\gamma)$ で与えられ、結晶の位置では $7.9 [\text{mm}]$ (σ_{BM}') となる。水平方向ではもちろん、一様である。

アンジュレータの高調波の分散角 Σ_u について見ると、エミッタанс $\epsilon = 0$ の電子ビームからの放射の分散角を Σ_p 、電子ビームの分散角 σ_e 、高調波の次数を n とすると、

$$\Sigma_u^2 = \sigma_e^2 + \Sigma_p^2$$
$$\Sigma_p = 1 / (2\gamma) \times ((1+K^2) / 2 / (nN))^{0.5}$$
$$\sigma_e = 6.5 [\mu\text{rad}] \quad (\text{SPring-8 High } \beta)$$

のように与えられる。アンジュレータの周期数 N が増えるほど狭い分布になる。熱流束分布の分散角 $1/(2\gamma)$ と比べて、この基本波の分散は、 $N = 61$ の場合で約 $1/4$ になる。

付録 2 解析コードANSYSの使用

この章では、有限要素法解析コード ANSYS の使用にあたっての詳細を述べる。

研究者が、ある計算コードを初めて扱わねばならない場合、まず直面するのが使用方法の習得である。ほとんどの場合、そのマニュアルは数冊に渡る大規模なものとなっている。全てを読破する余裕がない場合、必要としている部分を判断し、その部分のみを理解しようと努めるわけだが、ゼロからスタートした者が断片を理解するのは不可能に近い。結局、類似した計算コードを利用している経験者の手助けが必要になるわけで、経験者のノウハウが最良のマニュアルとなる。

計算コードの使用にあたっては、そのコードを 100% 理解し活用する必要はほとんどなく、研究者が欲する機能のみを使いこなせば良いという場合が多い。本解析も同様であり、ANSYS 内部の熱応力解析のみが必要であった。SPring-8 に携わっている大型放射光施設開発室では、今後も同様の熱応力解析が必要とされるので、松木らと筆者が行った解析の具体的な作業をまとめておく。未経験者が解析を行う際の一助となれば幸いである。

A2.1 システム構成

本解析に用いたシステムの構成機器を以下に示す。

パーソナルコンピュータ	: PCH98 model U90
オーバードライブプロセッサー	: 486DX2 50MHz 相当 (JBOXODP486SX-25)
数値演算コプロセッサー	: 387 DX (JBOX80387SX-20)
増設 RAM 合計	: 16 MB
シリコンディスク	: 40 MB
ハードディスク	: 500 MB×2
プリンター	: カラーハードプリンター (OHP 可)
DOS	: MS-DOS Ver. 5.0
熱応力解析コード	: 386 ANSYS REV. 5.0

ANSYS の実行中は、ハードディスクに解析中の一時演算結果が書き込まれていくので、その空容量によって、扱える解析モデルの大きさが決まってしまう。そのため余裕をみて、約400 MB 分を様々な途中経過ファイルの書き込み先に割り当てている。また、解析結果のデータ量が膨大なため（本解析の場合、1 ケースの熱解析および応力解析結果を完全に保存しておくためには、およそ 35 MB 必要）、全てのケースの解析結果を保存しておくことはできない。本解析では、熱応力解析まで終了させるのに、1 ケースあたり 3~4 時間である。

A2.2 ANSYS 実行に必要な事項

A2.2.1. ソリッドモデル作成について

解析モデルを作成するためには、まず、対象となる構造物をソリッドモデルに表現する。このソリッドモデルとは、構造物の外形を、複数のキーポイント（点）、ライン（線）、エリア（面）、ボリューム（立体）を使って定義したものであり、マクロに見るとソリッドモデルは複数の小さなボリュームから成り立っている。ボリュームを細かくとれば構造物に近いソリッドモデルが作成でき、粗くとすればデフォルメされたモデルとなる。ソリッドモデルの形状は計算対象である節点の数とは関係がないため、理想的には、なるべく実設計に近いソリッドモデルにした方が望ましい。なお、ボリュームの定義は、v（8個のキーポイントから、6面体ボリュームを定義するコマンド）または vdrag（エリアの並行移動の軌跡が、ボリュームとして認識されるコマンド）で行った。

たいていの熱環境はなんらかの対称性を持っているので、それに応じて一部分のソリッドモデルを作成して解析を行えば良い。今回は、熱流束分布が4回対称だったので、実設計の1/4をソリッドモデルにしている。ソリッドモデルの作成も、構造物の連続性を見いだし、コピーを多用する。例えばフィン形状等は、フィン一枚分のソリッドモデルを作成してしまえば、あとは枚数分それをコピーすれば良い。

A2.2.2. 解析モデル作成（ソリッドモデルを要素分割する）

ANSYSでは節点と呼ばれる計算点において各種の計算が行われる。節点を定義するには、ボリュームをいくつかの要素（節点に囲まれた微小領域）に分割する。ボリュームとボリュームとの境界面では、要素分割は一致していたほうが良い。要素分割が細かいほど節点数は多くなり、解析の精度は増す。また、不要な部分のボリュームを粗く要素分割することで、無駄無く解析を行うことができる。

また、節点数と解析精度とは漸近の関係にあり、効率よく計算を行うための必要十分な節点数が存在することが予想される。それを越えて節点数を増すのは計算時間を浪費するだけである。図A6に節点数と解析結果（温度）との関係の一例を示す。これは同一のソリッドモデル（マイクロパイプ付板）について、節点数を変えて解析を行ったものであり、10000点を越えたあたりから解析結果が69[°C]に収束し始めることがわかる。今回の報告に用いたマイクロパイプ付板の解析モデルでは、節点数はおよそ8000点であるので、収束値との差は4[°C]程度であり、解析上問題はないと考えられる。

要素の形状も重要であり、ANSYS内で多種用意されている中から解析に適した形状を選択する。立体要素で代表的なものとしては、4面体(STIF 87)、6面体(STIF 70)がある。前者は「要素分割がほとんど自動で行える」など、理想的で使いやすい。後者は複雑なソリッドモデルを手動で要素分割する際に使用すると良い。今回は、後者を用いた。

A2.2.4. 热入出力の設定

解析モデルが完成したら、次は熱の入出力の定義である。今回は熱の設定を「解析モデル表面上のエリアを選択し、熱伝達率と雰囲気温度を設定する」という方法で行った。水路等の冷却面については、冷媒—冷却面間の熱伝達率と冷媒の温度を設定すれば良い。ビーム照射面等の熱入力面については、熱流束値を熱伝達率および雰囲気温度で表わさねばならない。この表現に必要な数式を以下に示す。また、本解析

では、水温を 27 [°C] のまま変化しないものとしている。

$$h_{qtb} = h_q / h_{tb}$$

h_{qtb} : 热伝達率 [W/(m²·°C)]

h_q : 热流束 [W/m²]

h_{tb} : 霧囲気温度 [°C] (適用温度 « h_{tb})とする。今回は $h_{tb} = 1 \times 10^{10}$ とした。)

热流束分布のデータ入力プロセスとしては以下が理想である。

- ① 解析モデルの热流束分布設定位置の要素分割状態を確認する。
- ② 外部プログラムを使用して、解析モデルの要素分割状態をもとに热入力データを前調整しておく。
- ③ ②を各要素に直接貼り付ける。

今回は時間の都合で、②を ANSYS 内部コマンドのみで行った (A2.3を参照) ため誤差が大きく、そのままでは実際の热流束分布をモデルに再現できなかつたため、手動でデータ調整を行う必要があった。特に重要なのが入熱総量の調整である。一例を挙げると、要素分割が粗いときには、実際の入熱総量 850 [W] に対して、解析モデル上の入熱総量が 500 [W] という決して無視できない誤差があった。これは、解析モデルに热入力データを入力する際のデジタイズに関する誤差である。苦労して調整した热入力データも、このデジタイズがうまくいかなければ全く無意味となる。このような場合は要素分割密度を上げれば解決するが、システムの制限から解析可能な要素数には上限があり、データを直接調整する必要が必ずてくる。今回は、実際の热流束分布データの中腹部に若干の水増しを行うことで入熱総量を調整した。しかし、最も有効な方法は②である。時間があるのならこの方法を推薦したい。とにかく、热解析計算の際には、自分の作成した解析モデルの入熱総量を確認することが絶対必須である。

A2.2.5. 热伝導率の設定

热伝導率は温度の関数であるから、到達温度に応じて変化する。今回の温度範囲では、銅については無視できるが、シリコンについては無視できない大きさとなり、考慮しなければならない。そこで、mpdata コマンドを使用して、シリコンの热伝導率の温度依存性を入力した。

A2.2.6. 热解析

今回の解析では、解析を热解析と応力解析の 2 段階に分けて行った。前者の温度解析結果を利用して、後者を行うためである。解析モデルの情報は File.DB に、热解析による各節点の温度解析結果は File.RTH に保存されるので、热解析終了後は他ディレクトリにコピーして保存しておくのが望ましい (他のケースを解析すると、上書きされる)。また、本解析では、解析開始時の解析モデル温度と水温を 27 [°C] として、解析を行っている。

A2.2.7. 束縛条件と応力解析

応力解析は、図 9 に示したような侧面固定、底面固定、境界面固定等の束縛条件の定義を行ってから実行する。固定とは文字通り、ある節点をある方向に動かなくすることである。束縛条件は節点に対して行う。今回は、ソリッドモデル上のある面内に含まれる全節点に対して、という形で束縛条件を設定している。

応力解析を行う前に、热解析による温度解析結果 File.DB と File.RTH の 2 つのファイルを読み込む必

要がある（もっとも 1 つのケースについて熱解析→応力解析を一氣に行うならば、読み込む必要はない）。

A2.2.8. 解析結果の表示

解析結果の表示を行うには、POST モードという結果処理専用のモードに移行する。ANSYS 内には、解析結果を表示するためのコマンドが多数用意されているが、今回活用したのは任意の直線上の温度分布表示である。prpath というコマンドを用いて容易にデータの書き出しができる。

ANSYS の解析結果における温度表示は、例えば、40 [°C] という結果は、「40 [°C] になった」という到達温度を意味する。

A2.2.9. 解析結果の加工

ANSYS 内の機能のみでは、実行できない種類のデータ処理は、MS-DOS 上で行うことになる。例としては、3.6 変位量と素子表面うねり角や、3.7 変形率等の数値の算出があげられる。手順としては、処理したいデータを /output コマンドで任意のファイルに書き出し、その後、自作のプログラム（筆者は BASIC を用いた）を使って MS-DOS 上で処理する。本報告書のグラフに用いたデータは全てこの方法で出力している。

A2.3 作業の手順

今回採用した作業手順を以下に述べる。詳細は解析ファイル内容を参照すること。

- ソリッドモデルは要素形状と同じ形状のボリュームに分割すると、ボリュームを要素分割する際の分割数制御の際に容易である。今回は 6 面体 (STIF 70) を要素に選んだので、ソリッドモデルは 6 面体ボリュームに分割することにした。まずだいたいのソリッドモデルイメージをスケッチしておく。以下、ANSYS への入力を始める。
- 各ボリュームの頂点となる位置にキーポイントを定義する。
- ボリュームを定義する。定義方法は臨機応変に対処。主として v コマンド（8 つのキーポイントから、ボリュームを定義する）がある。筆者は vdrag を多用した（例えば、ある構造物が回転体だった場合、任意の一面のみをエリアとして定義しておき、そのエリアを回転すれば詳細な回転体のソリッドモデルが完成する）。
- 要素分割を行う。

自動分割を行わない場合は以下の手順で手動分割する。

1. 詳細な解析を行いたい箇所のボリュームを選ぶ。
 2. そのボリュームに含まれる各ラインの要素分割数を定義する。隣り合うボリューム間の境界では、要素分割数は一致させること。
 3. 以外のボリュームについては、ANSYS 内のコマンド (esize 等) を用いて、一挙に要素分割を行う。
- 解析モデルの冷却水路部分の水に接しているエリアのみを選択し、熱伝達係数と雰囲気温度を設定す

る。

- 解析モデルのビーム照射部のエリアのみを選択し、熱伝達係数と雰囲気温度を設定する。今回の場合、熱流束に勾配があるため、以下のようにエリアの選択を工夫した。
 1. ある熱流束値がどの程度の広がりを持っているかをデータにしておく。例えばアンジュレータの場合、中心ほど高熱流束となるような、同心楕円の連なりで表わせる。
 2. 1. の最外線に注目し、それよりも内側の全てのエリアに、最も低い熱流束を設定する。
 3. 最外線のすぐ内側の境界線に注目し、それよりも内側の全てのエリアに、1. の次に高い熱流束を設定する。このとき、1. で設定された熱流束は上書きされてしまうので問題ない。
 4. 2. ~3. を中心まで繰り返すと勾配のある熱流束が設定できる。
- solve コマンドを入力し、熱解析を開始する。今回の場合、熱解析のみにかかる時間は 1 時間程度である。

ここまで機能は、解析モデルおよび熱伝達面ファイル（ bmnfh5.dat 等）に集約した。

- 応力解析のための束縛条件を設定する。ある平面に含まれる節点を選択し、束縛する。温度解析結果 File.DB と File.RTH を読み込んでから、solve コマンドを入力し、応力解析を開始する。今回の場合、応力解析のみにかかる時間は、2 時間程度である。

この機能は、応力解析用束縛条件ファイル（ nfs.dat 等）に集約した。
- POST モードで結果を解析する。

この機能は、表示モード移行（ post5s.bat ）、解析結果の出力（ dtout.bat ）に集約した。

A2.4 各解析ファイル内容

以上で述べてきたのが本解析の具体的な作業内容だが、これだけの作業を 1 つ 1 つコマンド入力しているわけにはいかず、あるコマンド群をバッチファイルにまとめてから使用することになる。本解析では、以下のようバッチファイルを作成し、使用した。

- (a) 解析モデルおよび熱伝達面ファイル（ bmnfh5.dat 等）
 - (b) 応力解析用束縛条件ファイル（ nfs.dat 等）
 - (c) 表示モードへ移行（ post5s.bat ）
 - (d) 解析結果の出力（ dtout.bat ）
- (a) については、粗フィン付凹板の偏向電磁石（ bmnfh5.dat ）、マイクロパイプ付板のアンジュレータ（ unmph5.dat ）を添付、(b) については nfsb5.dat （粗フィン付凹板用の側面底面固定）を添付、(c)(d) については post5s.bat , dtout.bat を添付した。 nfsb5.dat は、若干の修正で他のモデルにも適用できる。 post5s.bat , dtout.bat はそのままほとんどの解析に適用できる。各バッチファイルの詳細は各リストの右側の説明と、ANSYS のマニュアルを参照すること。

A2.5 1 ケースの具体例

粗フィン付凹板、偏向電磁石、側面底面固定のケースについての具体的な作業手順を以下に示す。

パソコン電源 ON

ANSYS 作業を行うディレクトリに移動

ansys50 (ANSYS のメインプログラムを起動)

/menu, off (メニュー モードから抜ける)

/ input, bmnfh5, dat (熱解析～境界条件までのバッチファイルを起動)

save (file.DB の生成)

solve (熱解析開始)

finish (熱解析終了)

/ input, nfsb5, dat (束縛条件～応力解析までのバッチファイルを起動)

/ input, post5s, bat (post モードに移行)

/ input, dtout, bat (温度分布を表示)

付録3 热伝達率の計算（水を冷媒とした場合）

ここでは、2.4で行った現象論的式を用いる熱伝達率の計算方法について説明する。なお、これらの現象論的式で扱えるのは、水等の一般流体を冷媒にして、単相（沸騰なし）強制対流を考えた場合のみである。液体金属を冷媒に用いるなど、特殊な場合の計算については教科書^[A2]を参照のこと。

A3.1 層流と乱流の判別

流体を冷媒として冷却を行う場合に、熱伝達率を計算するためには、まず、その流れが層流か乱流かを判別する必要がある。フィン形状等円管以外の水路形状をもつ冷却構造の場合は、

$$\text{相当直径 } de = 4 \times S / L \quad [\text{m}] \quad \dots \quad (\text{A3-1}) \text{ 式}$$

S : 冷却水路断面積 $[\text{m}^2]$

L : 冷却水路周長 $[\text{m}]$

$$\text{レイノルズ数 } Re = v \times de / \nu \quad \dots \quad (\text{A3-2}) \text{ 式}$$

$Re \leq 2300$ ならば層流、 $Re > 2300$ ならば乱流

v : 遠方の冷却水流速 $[\text{m}/\text{s}]$

ν : 水の動粘性係数 $= 0.857 \times 10^{-6} \text{ [m}^2/\text{s}]$ (at 23 [°C])

水路形状が円管ならば、 de は円管直径を用いると良い。以後、層流ならば A3.2 へ、乱流ならば A3.3 へ移り、ヌセルト数 Nu を計算する。算出した Nu を (A3-3) 式へ代入して、熱伝達率 H を計算することができる。

$$\text{熱伝達率 } H = \lambda \times Nu / de \quad [\text{W} / (\text{m}^2 \cdot \text{°C})] \quad \dots \quad (\text{A3-3}) \text{ 式}$$

λ : 水の熱伝導率 $= 610.4 \times 10^{-3} \text{ [W} / (\text{m} \cdot \text{°C})]$ (at 23 [°C])

A3.2 層流の場合のヌセルト数の計算

まず、熱伝達率を計算する地点（ x ：水路入口からの距離 [m] で表す）での流れが発達流か未発達流かどうかを判別する。その後、以下に示す各章に移り、ヌセルト数を計算する。

$$\text{速度助走区間} \quad le = 0.05 \times Re \times de \quad \dots \quad (\text{A3-4}) \text{ 式}$$

$$\text{温度助走区間} \quad let = 0.05 \times Re \times de \times Pr \quad \dots \quad (\text{A3-5}) \text{ 式}$$

Pr ：水のプラントル数 = 5.850 (at 23 [°C]) , 4.642 (at 33 [°C])

$0.7 \leq Pr \leq 5$ かつ $x < le$ かつ $x < let$ ならば未発達流 (A3.2.1 で計算)

$0.7 \leq Pr \leq 5$ かつ $le < x < let$ ならば未発達流 (A3.2.2 で計算)

それ以外ならば発達流 (A3.2.3 で計算)

A3.2.1 層流、未発達流の場合（その1）

壁面温度一定の場合、 x^+ を以下のように計算してから、(1), (2) のいずれかの場合について、ヌセルト数 Nu を計算する。

$$x^+ = (x/de)/(Re \times Pr)$$

(1) $x^+ \leq 10^{-3}$ の場合

$$Nu(x) = 0.6366 \times (4 \times x^+/\pi)^{-1/2} / (1 + (Pr/0.0468)^{2/3})^{1/4} \quad \dots \quad (\text{A3-6}) \text{ 式}$$

(2) $10^{-3} < x^+ < \infty$ の場合

$$Nu(x) = 5.357 \times (1 + x^{*(8/9)})^{3/8} \\ \times (1 + (\pi/(284 \times x^+)) / (1 + (Pr/0.0468)^{2/3}))^{1/2} \\ / (1 + x^{*(8/9)}(3/4))^{4/3})^{3/8} - 1.7 \quad \dots \quad (\text{A3-7}) \text{ 式}$$

ただし、 $x^* = (388/\pi) \times x^+$

A3.2.2 層流、未発達流の場合（その2）

壁面温度一定の場合、 x^+ を以下のように計算してから、ヌセルト数 Nu を計算する。

$$x^+ = (x/de)/(Re \times Pr)$$

$$Nu(x) = 5.357 \times (1 + (388 \times x^+/\pi)^{-(8/9)})^{3/8} - 1.7 \quad \dots \quad (\text{A3-8}) \text{ 式}$$

（なお、参考として、 x^+ までの平均 Nu も与えておく。）

$$Nu_{av}(x^+) = 1.615 / (x^{+(1/3)}) - 0.2 ; \quad x^+ < 0.03 \quad (\text{A3-9}) \text{ 式}$$

$$Nu_{av}(x^+) = 3.66 + 0.0499/x^+ ; \quad x^+ \geq 0.03 \quad (\text{A3-10}) \text{ 式}$$

A3.2.3 層流、発達流の場合

壁面温度一定のとき、以下のように計算する。

$$Nu = 3.65 + 0.0668 \times (de/l) \times Re \times Pr / (1 + 0.04 \times ((de/l) \times Re \times Pr)^{2/4}) \quad \dots \quad (\text{A3-11}) \text{ 式}$$

l ：水路全長 [m]

A3.3 乱流の場合のヌセルト数の計算

まず、熱伝達率を計算する地点（ x ：水路入口からの距離 [m] で表す）での流れが発達流か未発達流かどうかを判別する。その後、以下に示す各章に移り、ヌセルト数を計算する。

$$\text{速度助走区間および温度助走区間 } le = 12 \times de \quad \dots \quad (\text{A3-12}) \text{ 式}$$

$x > le$ ならば発達流 (A3.3.1 で計算)

$x \leq le$ ならば未発達流 (A3.3.2 で計算)

A3.3.1 乱流、発達流の場合

Gnielinski の式 ($3000 < Re < 10^6$ 、 $0.5 < Pr < 2000$) から、以下となる。

$$Nu_{\infty} = \left(f/2 \right) \times (Re - 1000) \times Pr / \left(1 + 12.7 \times \left(f/2 \right)^{1/2} \times (Pr^{2/3} - 1) \right) \quad \dots \quad (\text{A3-14}) \text{ 式}$$

ただし、 f ：管摩擦係数 = $(3.64 \times \log_{10}Re - 3.28)^{-2}$

A3.3.2 乱流、未発達流の場合

以下のように計算する。

$$Nu(x) = Nu_{\infty} \times \left(1 + \left(x/de \right)^{2/3} \right) \quad \dots \quad (\text{A3-13}) \text{ 式}$$

参考文献

- [A1] Shigemi Sasaki, Nobuo Matuki, and Takeo Takeda
" SPring-8 prototype undulator ", Rev. Sci. Instrum. 63 (1), (1992) .
- [A2] " 伝熱工学資料 第 4 版 ", 日本機械学会 .

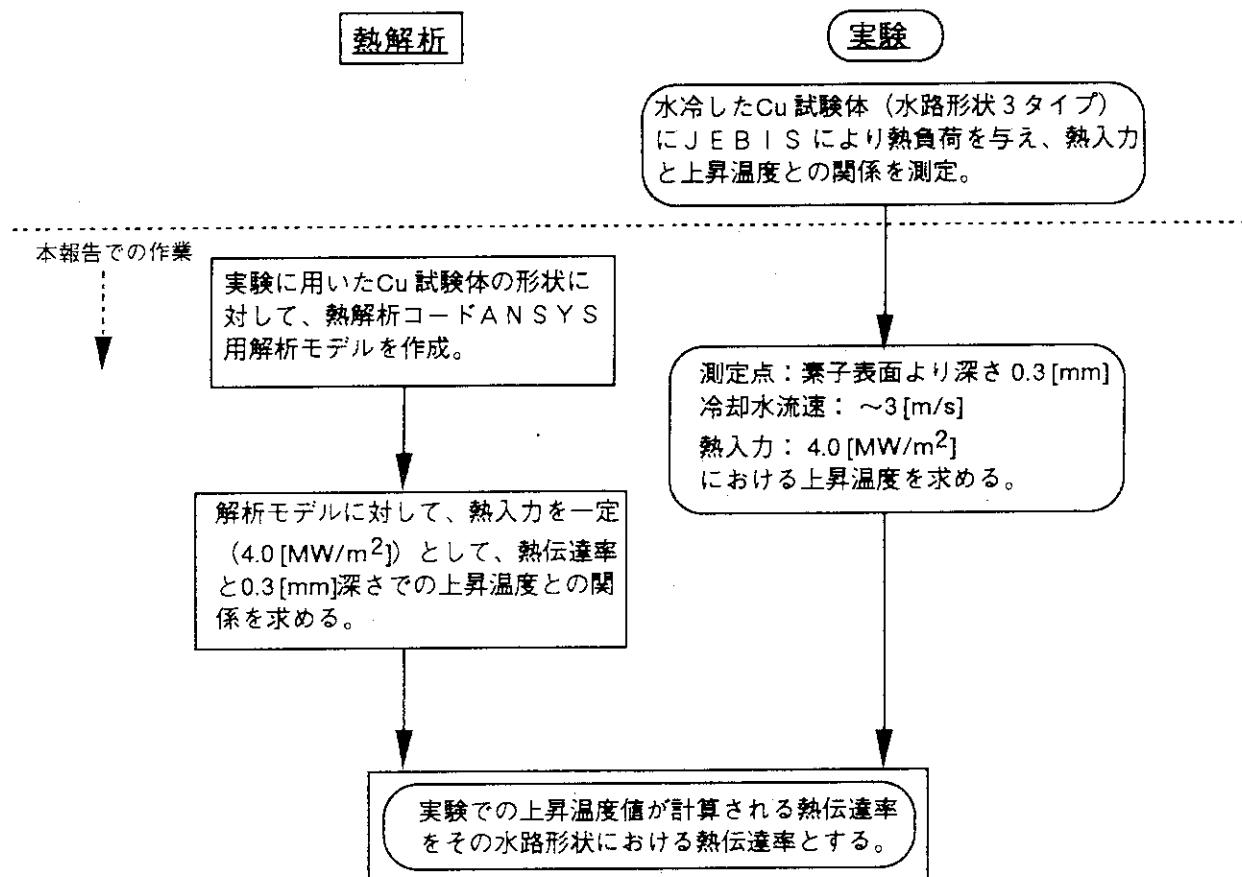


図1 热伝達率導出までの流れ図

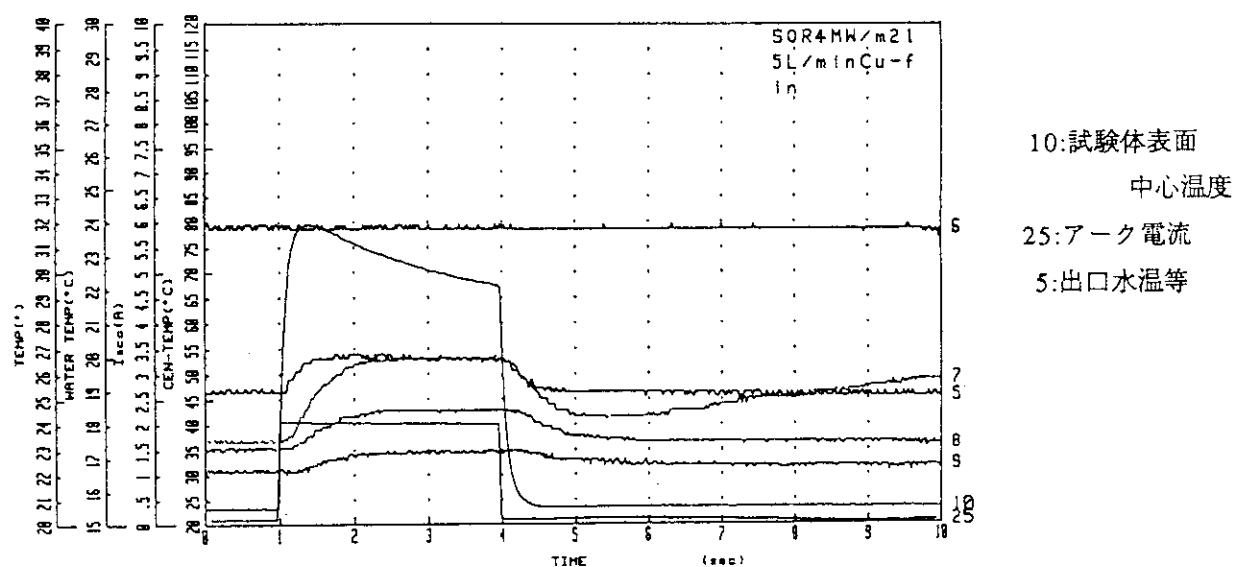


図3 3秒間電子照射した場合の温度変化（典型的な例）

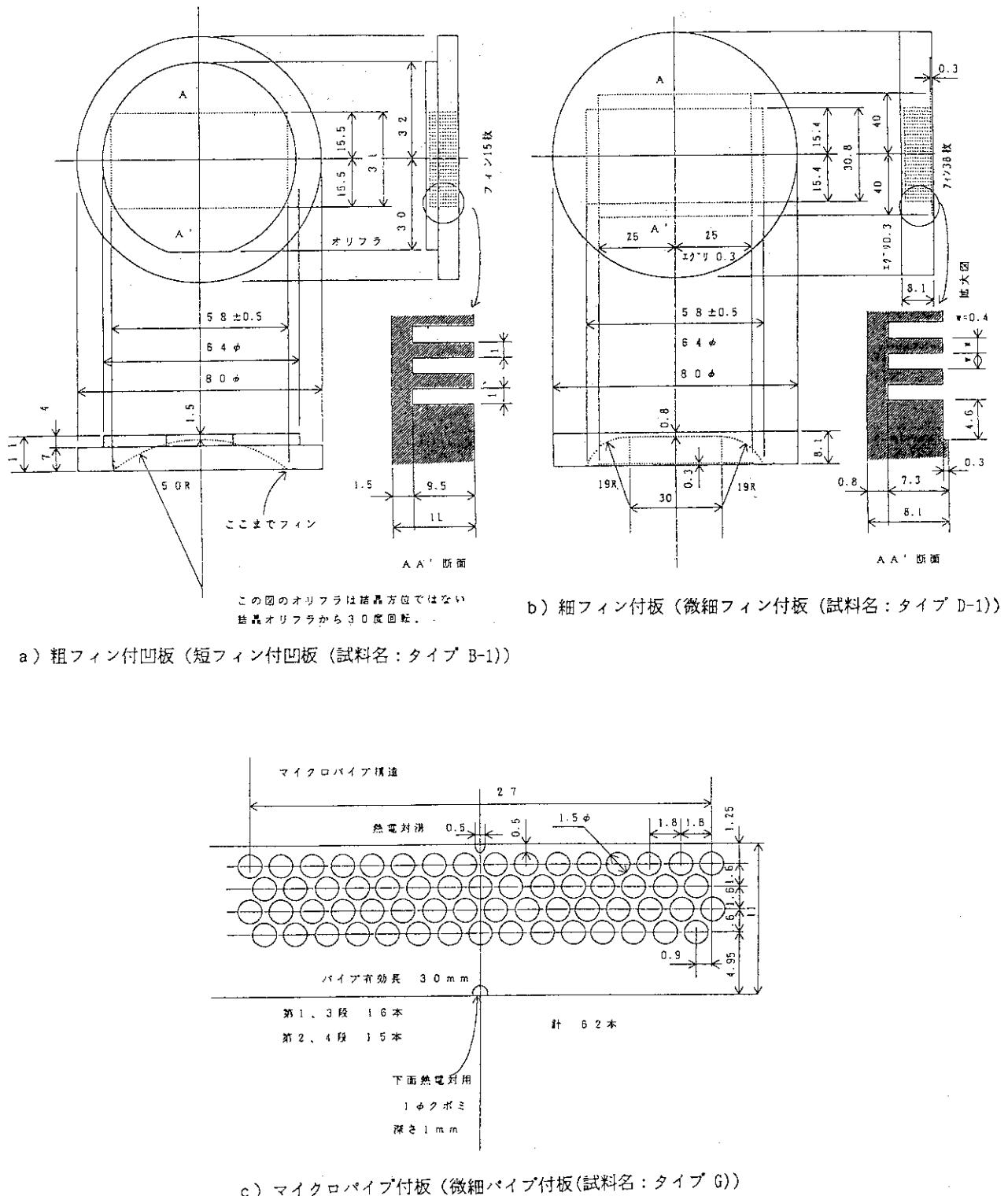


図2 热负荷試験に用いた銅試験体

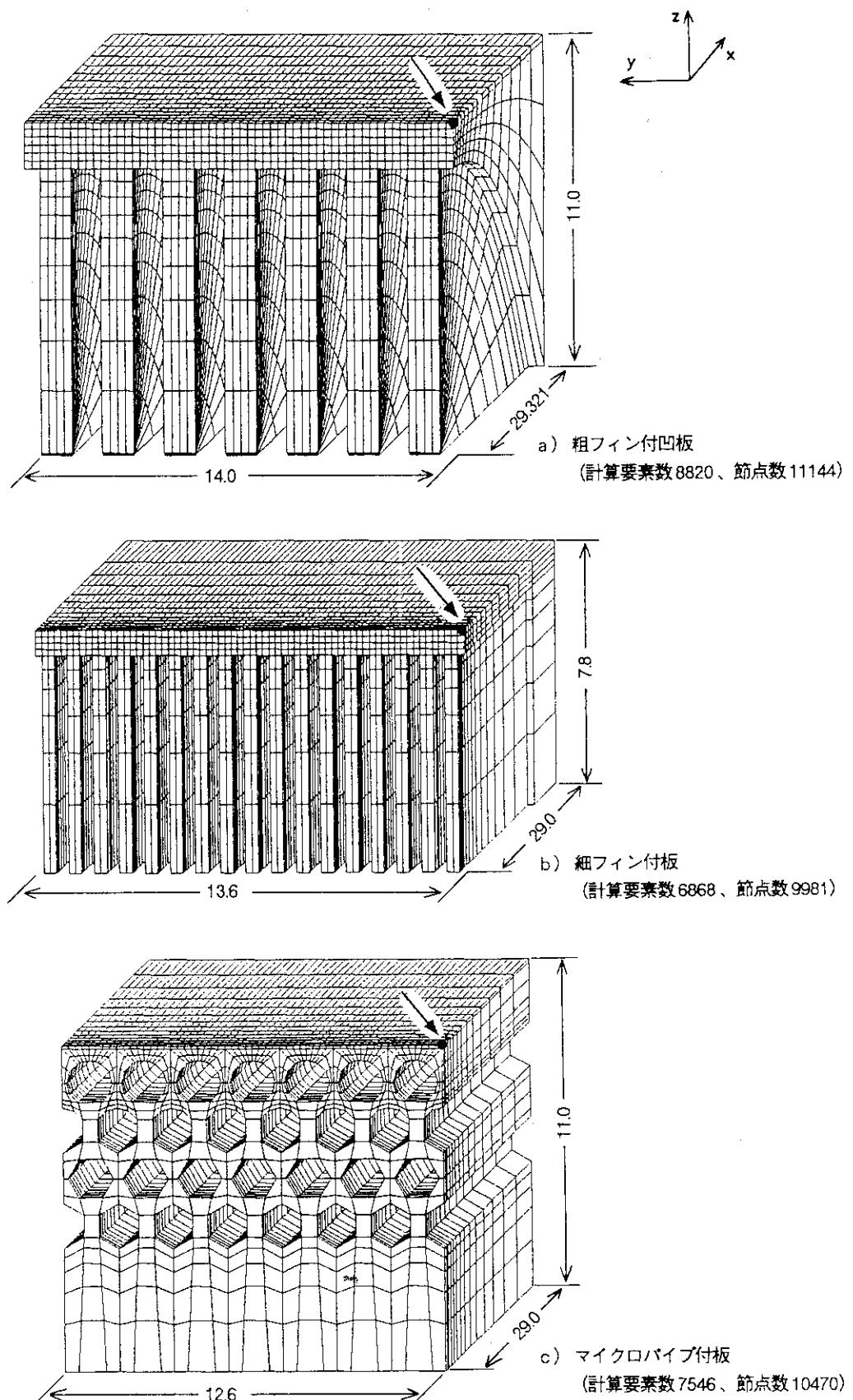


図4 要素分割した解析モデル
 (単位は [mm]、→は解析モデル原点を示す。)

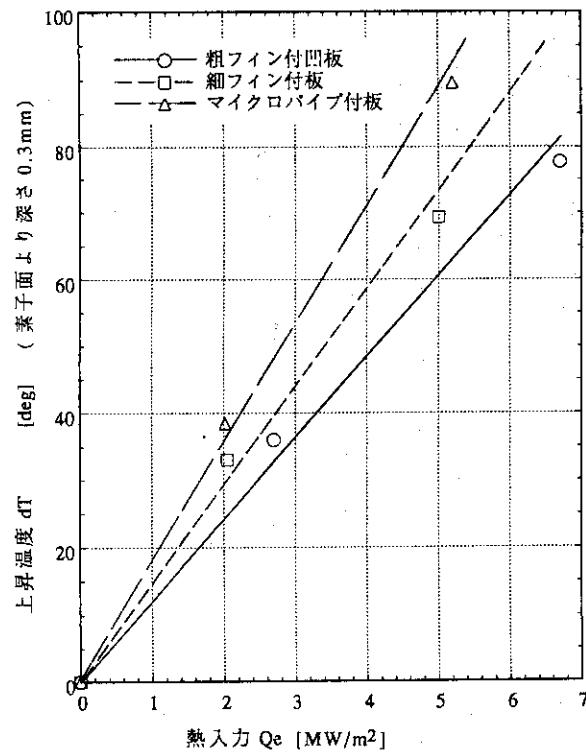
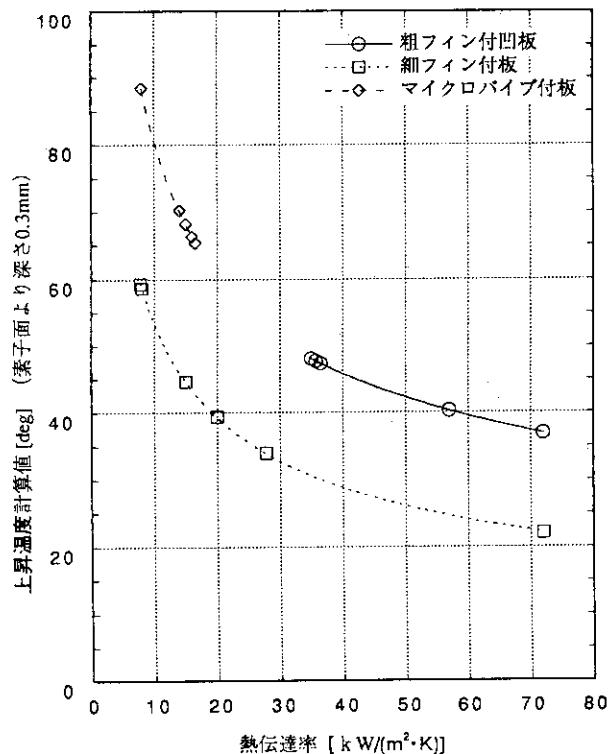


図5 热負荷実験結果（冷却水流速約3[m/s]）

図6 热伝達率と上昇温度計算値との関係
(熱流束4.0 [MW/m²])

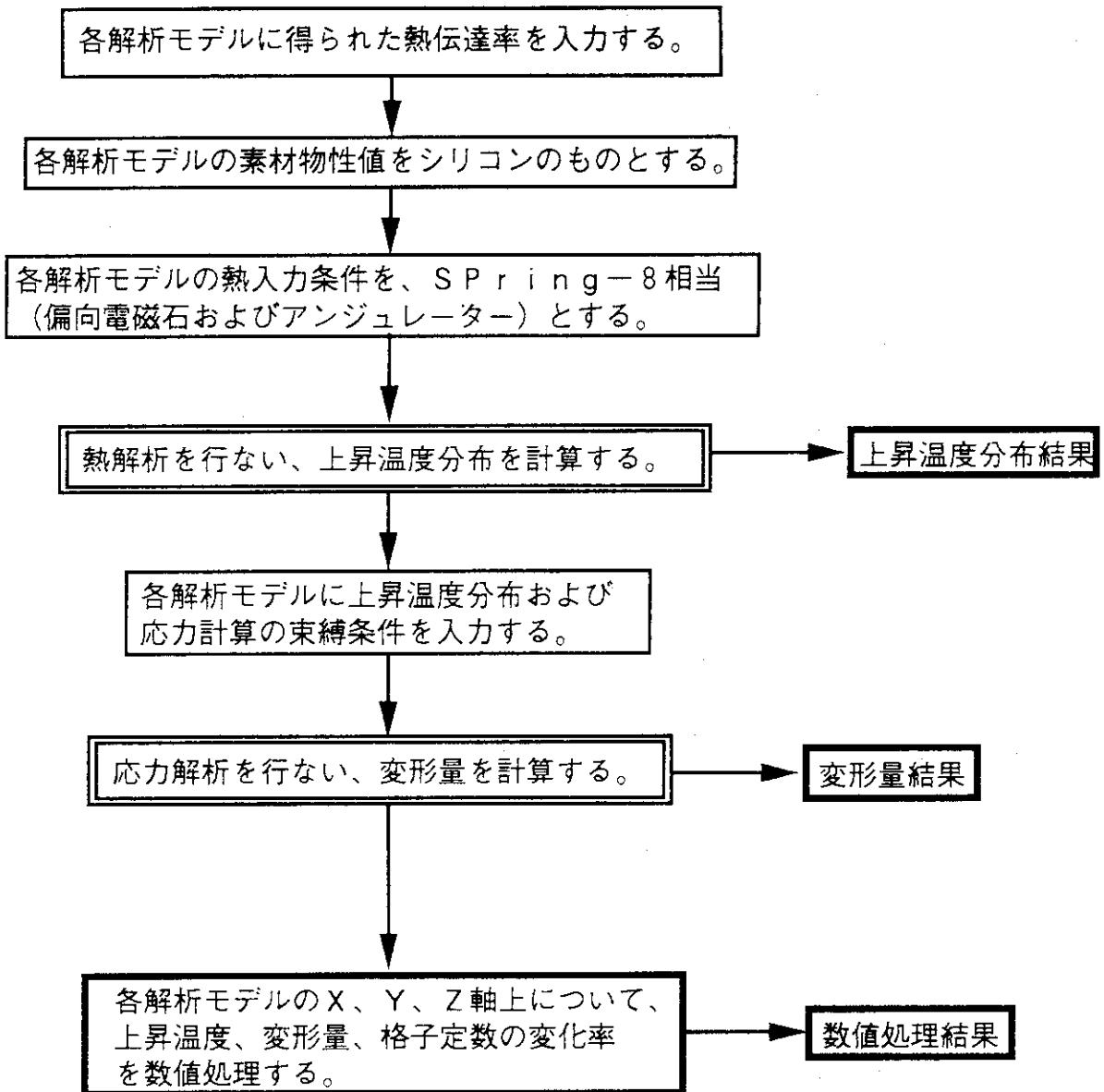


図7 SPring-8条件下での熱応力解析の流れ図

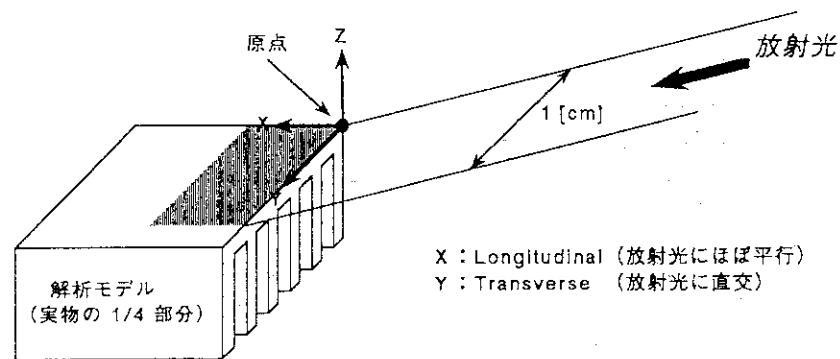


図8 解析モデルに対する熱流束
(この図は偏向電磁石だが、アンジュレーターも位置関係は同じ。)

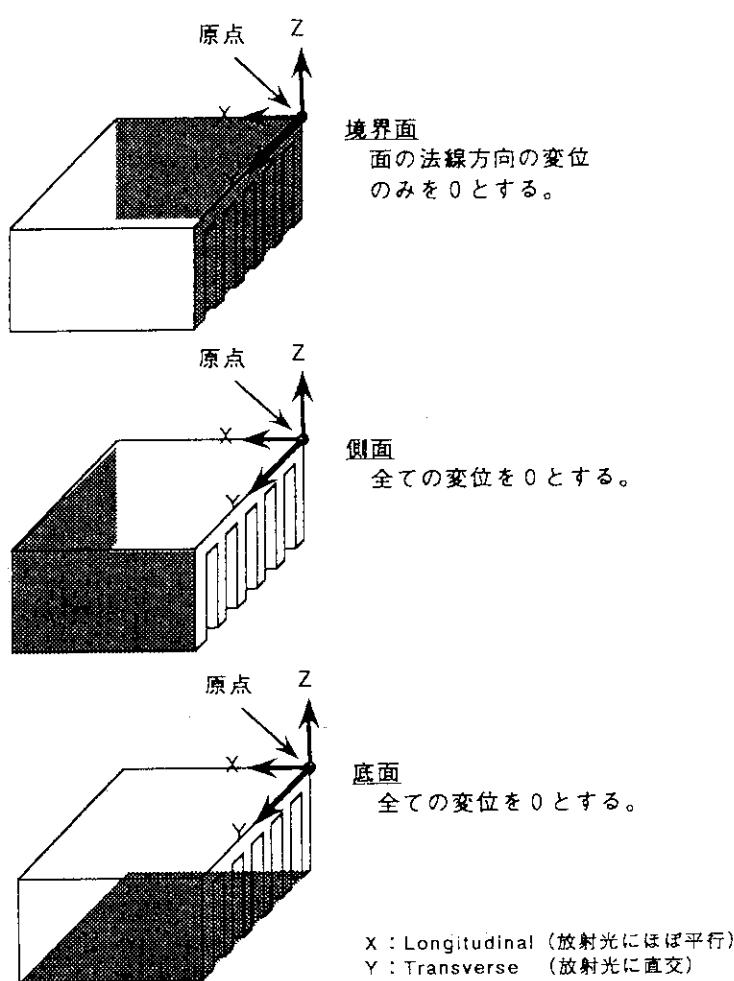


図9 解析モデルに対する束縛条件
(解析モデルは実物の1/4部分)

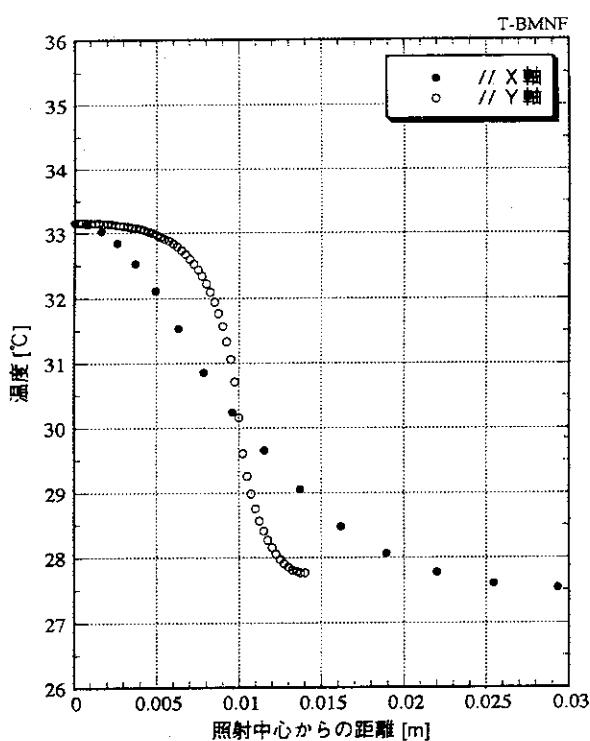


図10 a)温度分布
(粗フィン付凹板、偏向電磁石)

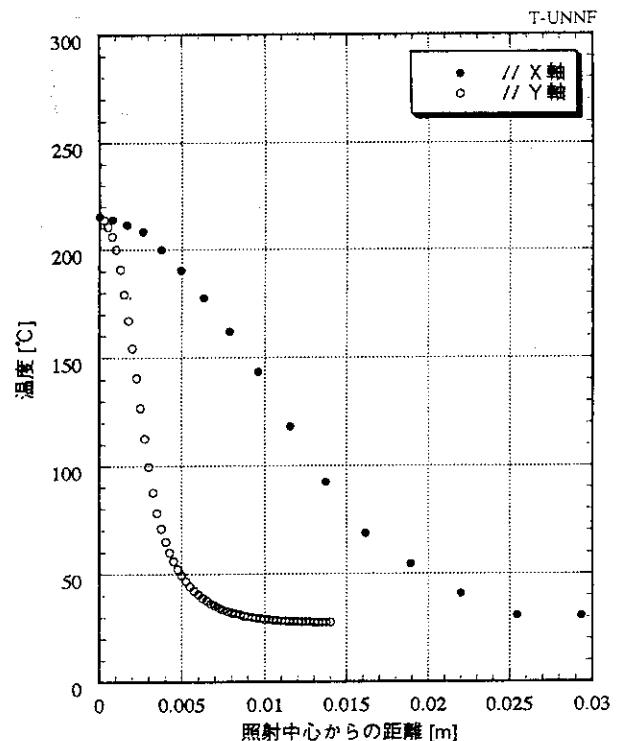


図10 b)温度分布
(粗フィン付凹板、アンジュレータ)

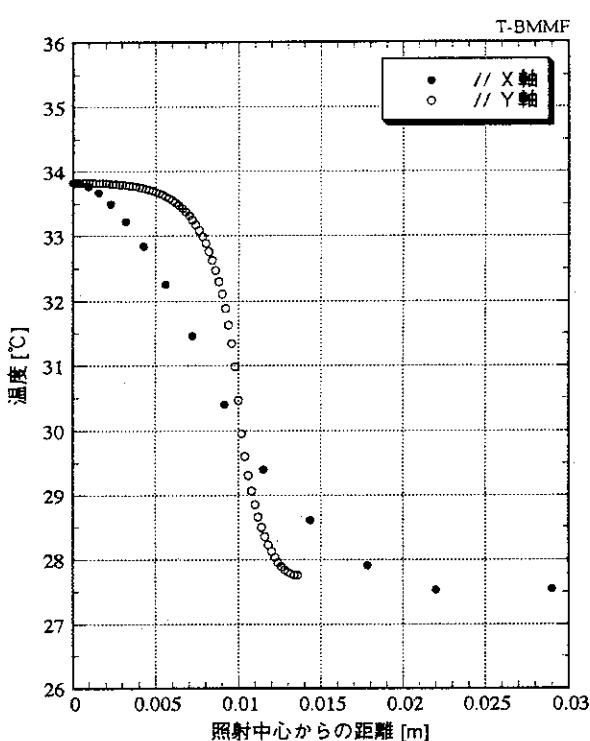


図11 a)温度分布
(細フィン付板、偏向電磁石)

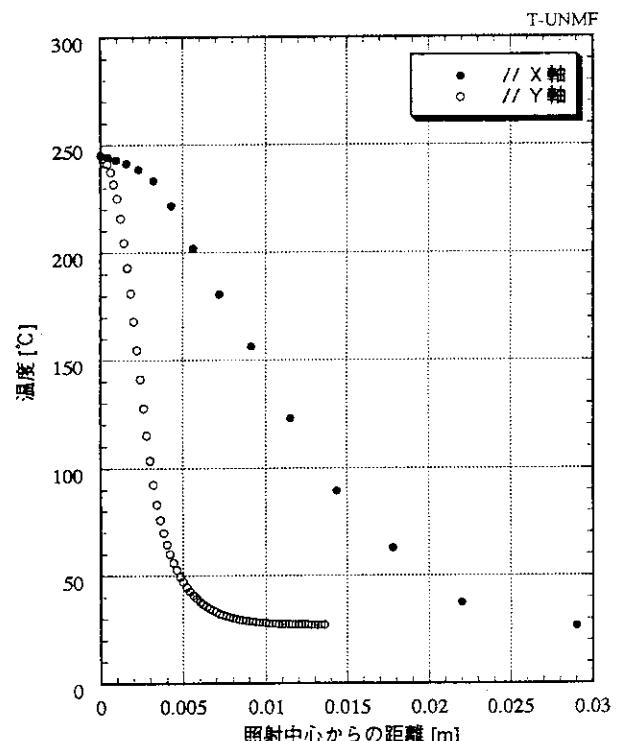


図11 b)温度分布
(細フィン付板、アンジュレータ)

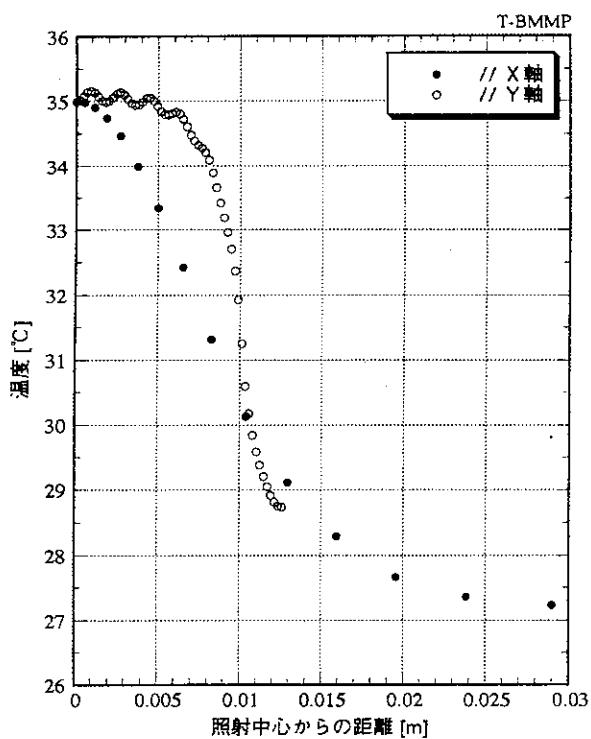


図12 a)温度分布
(マイクロパイプ付板、偏向電磁石)

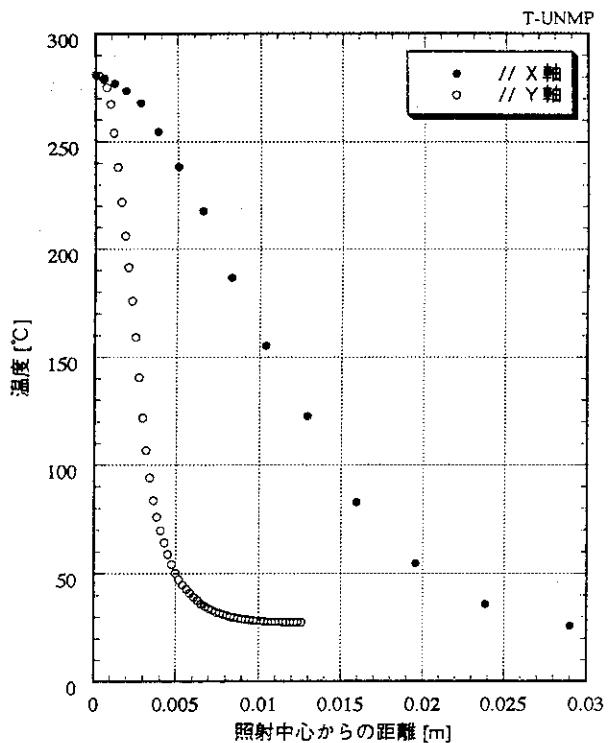


図12 b)温度分布
(マイクロパイプ付板、アンジュレータ)

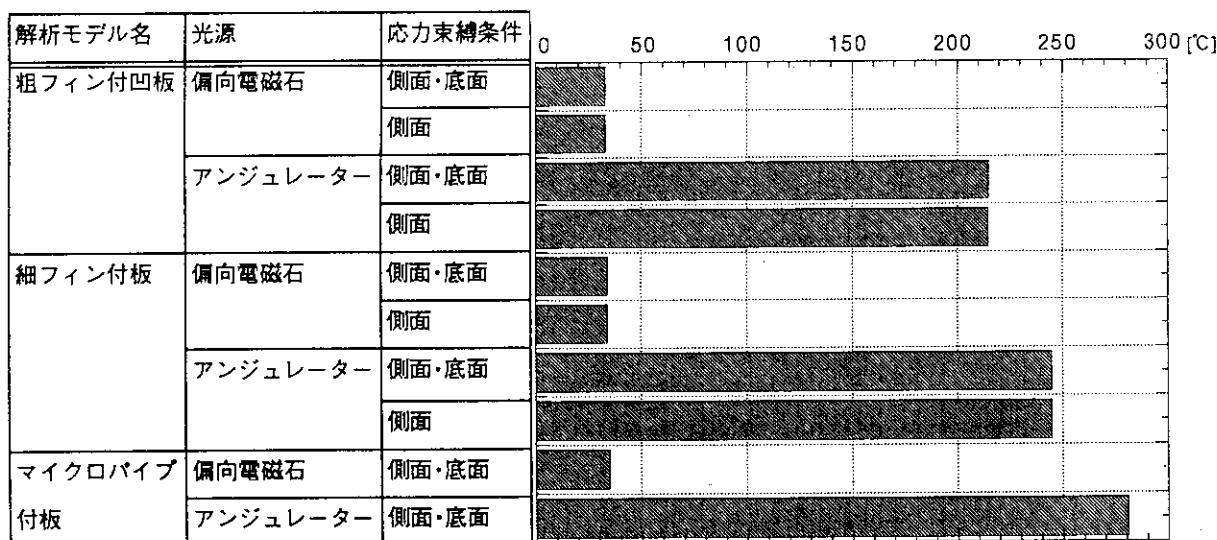
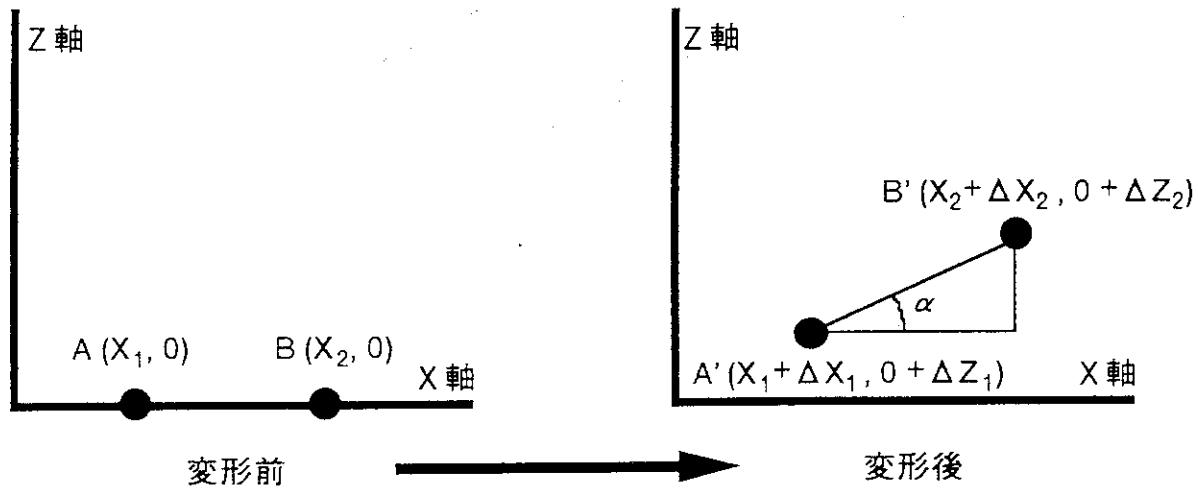


図13 各解析条件における最大温度



「B' 点での X 軸方向うねり角」 $\alpha = (\Delta Z_2 - \Delta Z_1) / ((X_2 + \Delta X_2) - (X_1 + \Delta X_1))$
 (注：ただし、本解析では $\alpha = (\Delta Z_2 - \Delta Z_1) / (X_2 - X_1)$
 として計算した。Y 方向も同様の計算を行った。)

図14 うねり角の計算方法

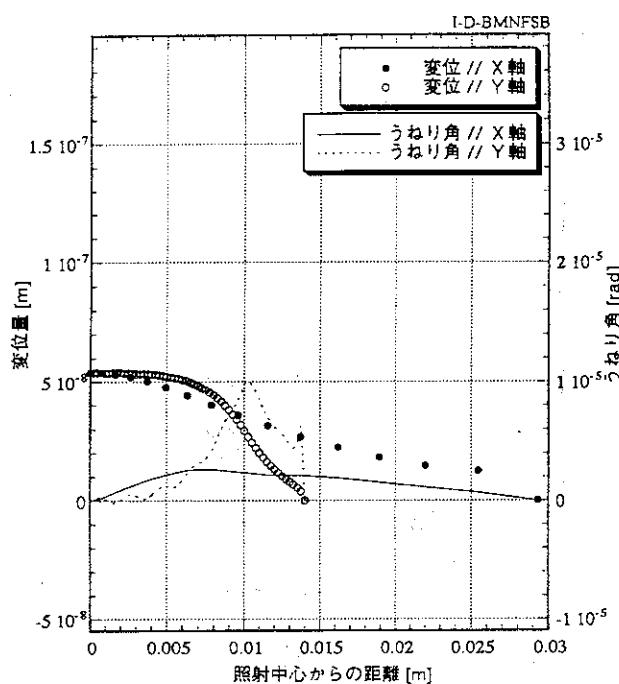


図15 a)変位、うねり角分布
(粗フィン付凹板、偏向電磁石、
側面底面固定)

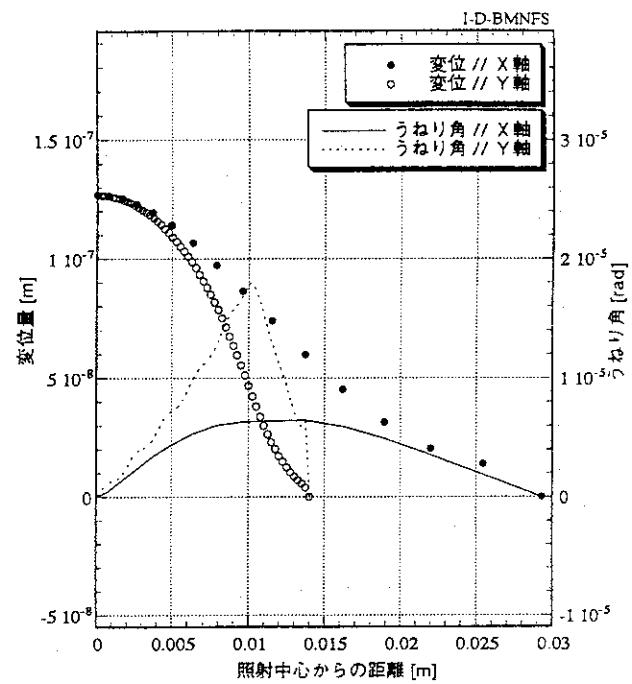


図15 b)変位、うねり角分布
(粗フィン付凹板、偏向電磁石、
側面固定)

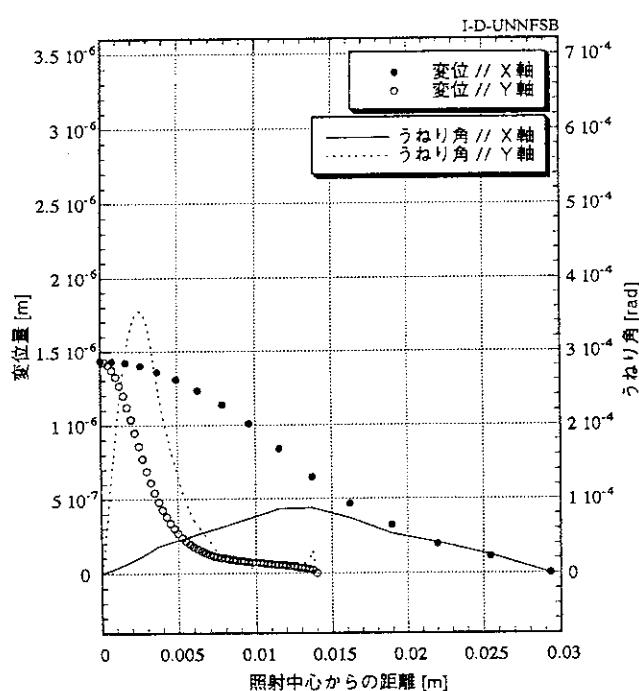


図15 c)変位、うねり角分布
(粗フィン付凹板、アンジュレータ、
側面底面固定)

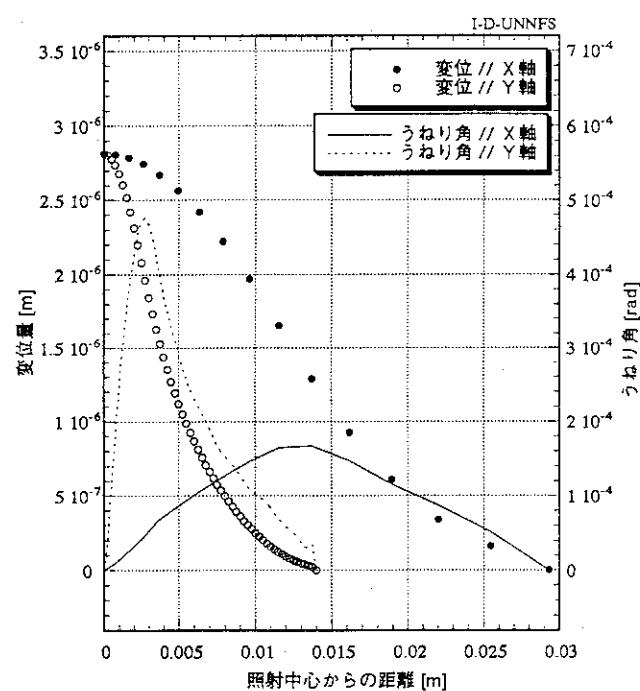


図15 d)変位、うねり角分布
(粗フィン付凹板、アンジュレータ、
側面固定)

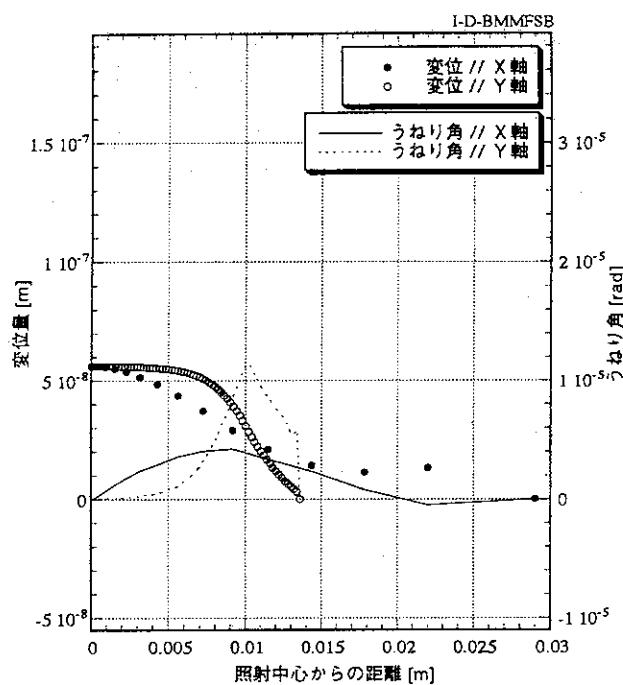


図16 a)変位、うねり角分布
(細フィン付板、偏向電磁石、
側面底面固定)

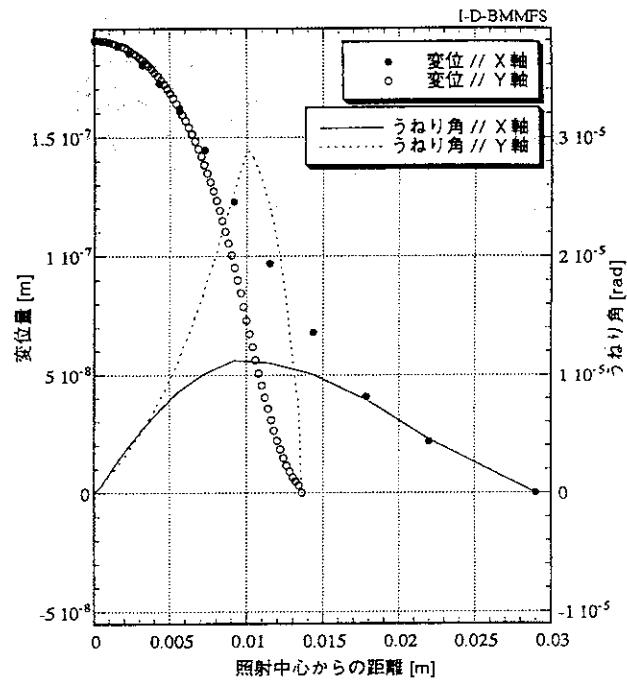


図16 b)変位、うねり角分布
(細フィン付板、偏向電磁石、
側面固定)

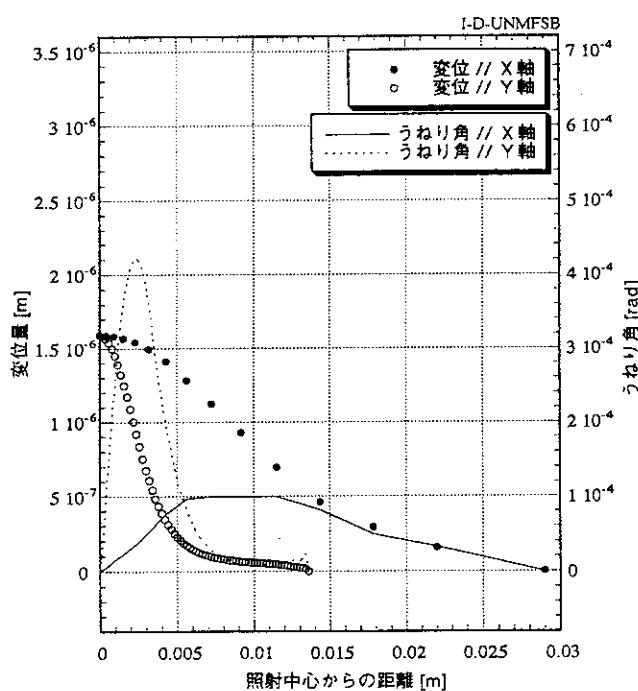


図16 c)変位、うねり角分布
(細フィン付板、アンジュレータ、
側面底面固定)

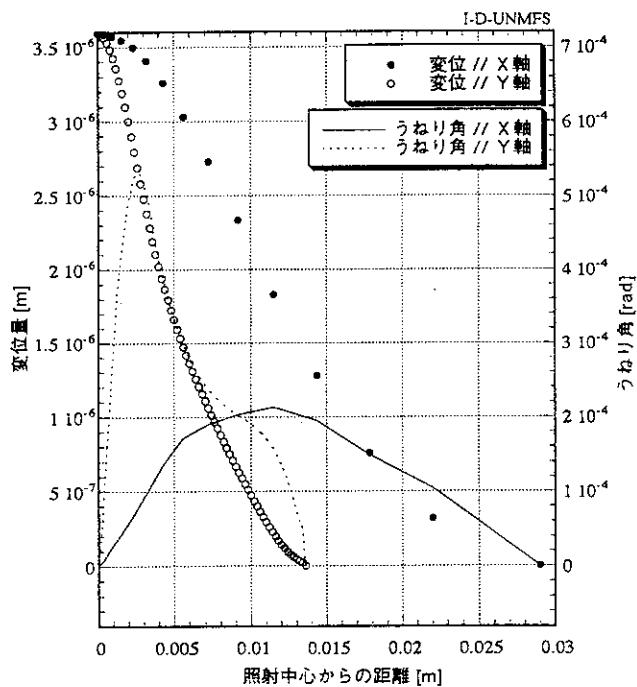


図16 d)変位、うねり角分布
(細フィン付板、アンジュレータ、
側面固定)

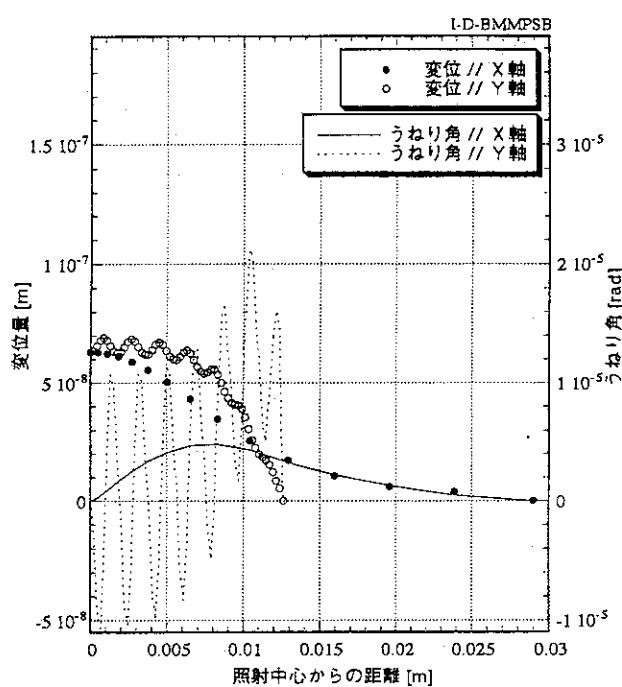


図17 a)変位、うねり角分布
(マイクロパイプ付板、偏向電磁石、
側面底面固定)

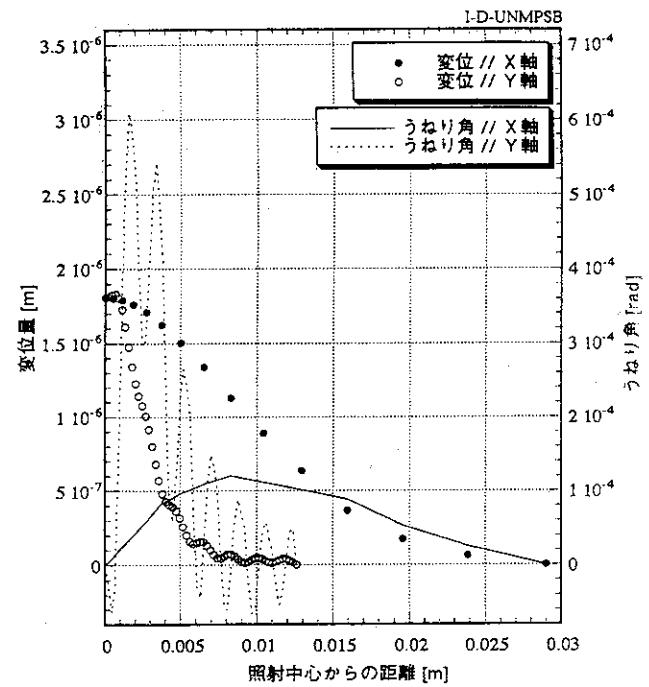


図17 b)変位、うねり角分布
(マイクロパイプ付板、アンジュレータ、
側面底面固定)

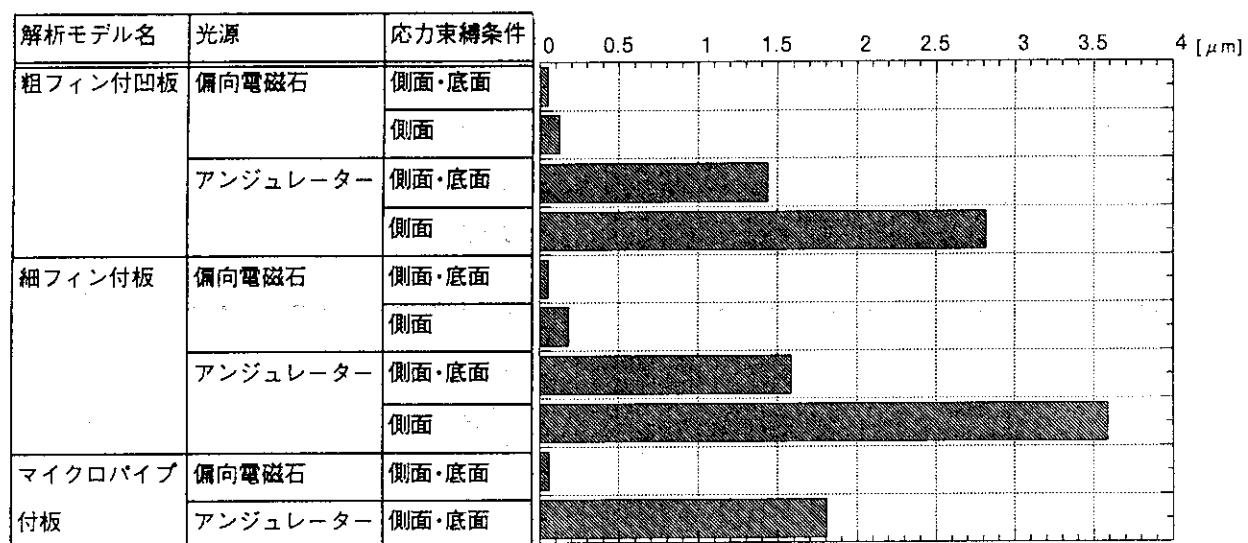


図18 各解析条件における最大変位量

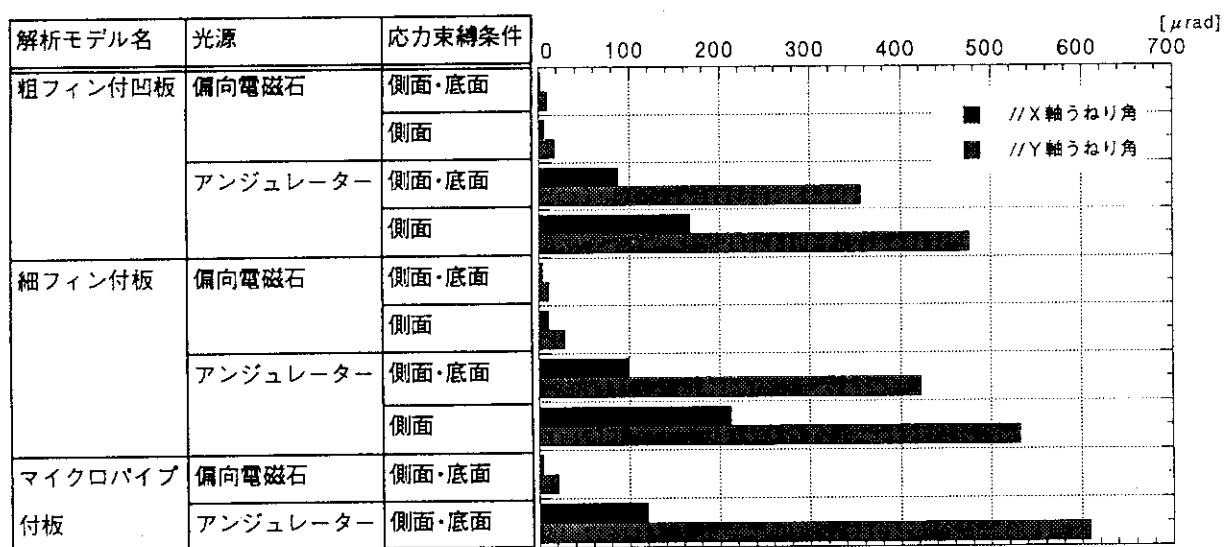
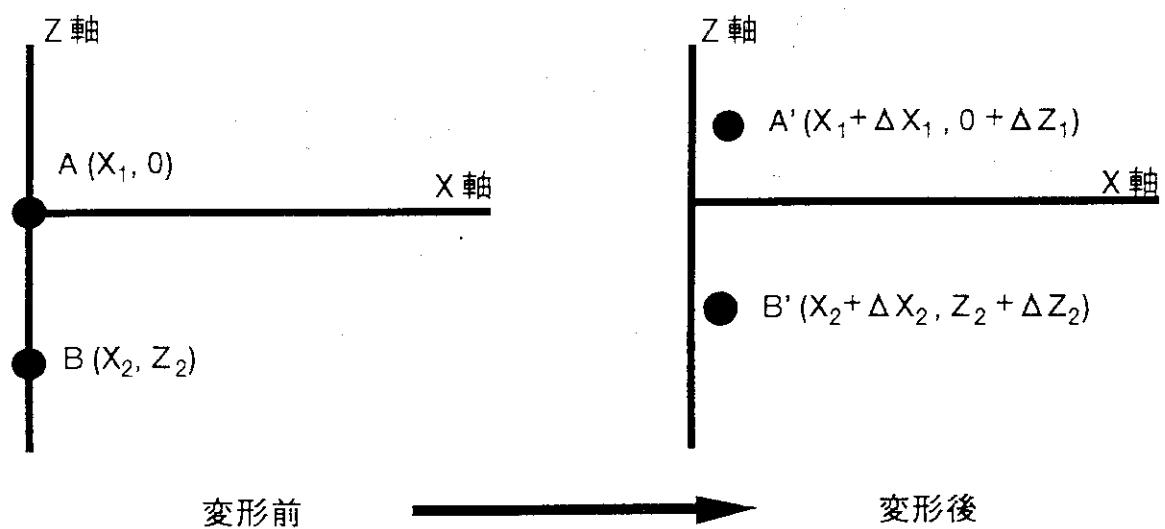


図19 各解析条件における最大うねり角



$$\text{「A' 点での Z 軸方向変形率」} = (\Delta Z_1 - \Delta Z_2) / (0 - Z_2)$$

図20 格子定数の変化率の計算方法

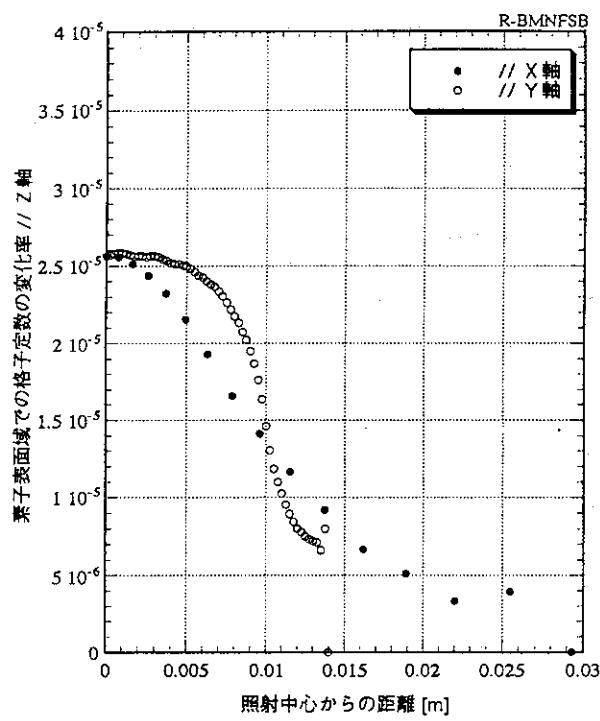


図21 a)格子定数の変化率分布
(粗フィン付凹板、偏向電磁石、
側面底面固定)

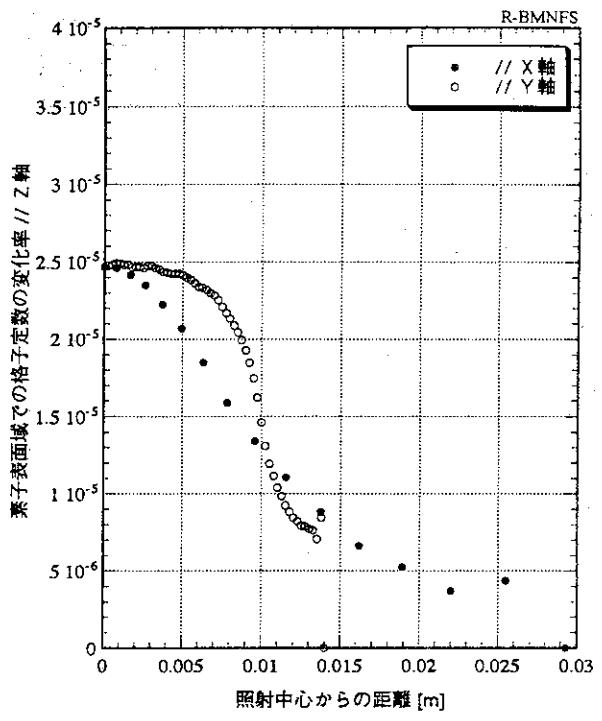


図21 b)格子定数の変化率分布
(粗フィン付凹板、偏向電磁石、
側面固定)

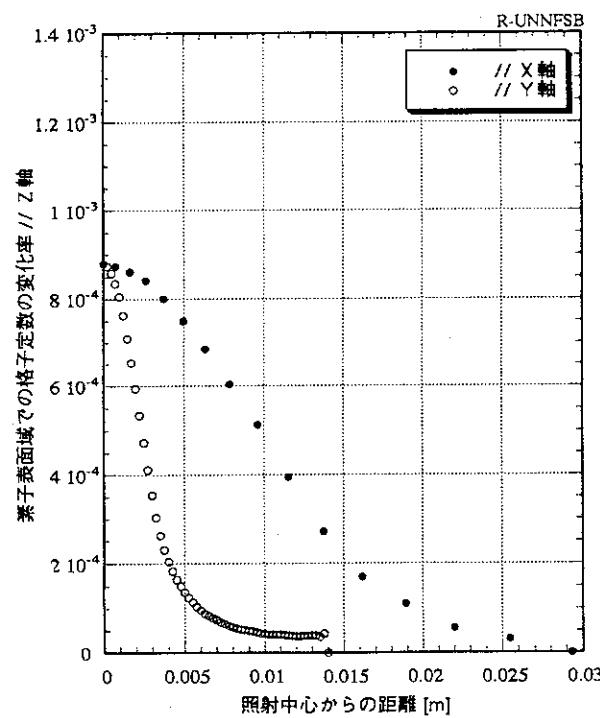


図21 c)格子定数の変化率分布
(粗フィン付凹板、アンジュレータ、
側面底面固定)

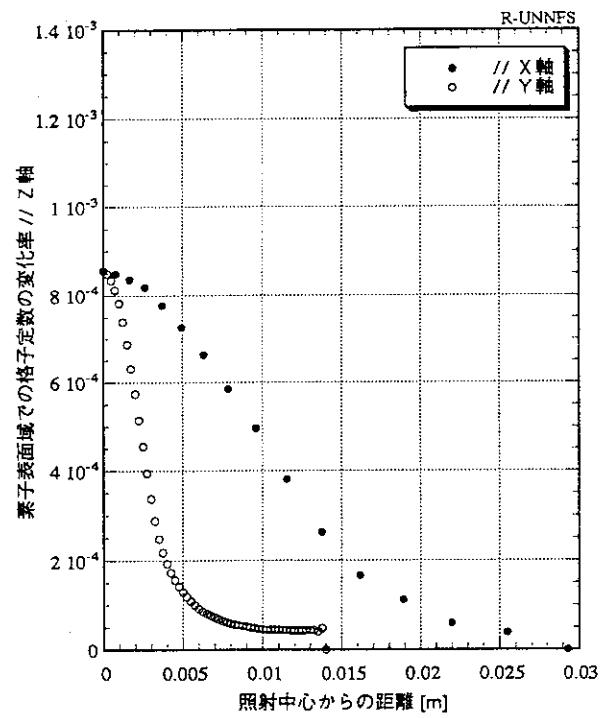


図21 d)格子定数の変化率分布
(粗フィン付凹板、アンジュレータ、
側面固定)

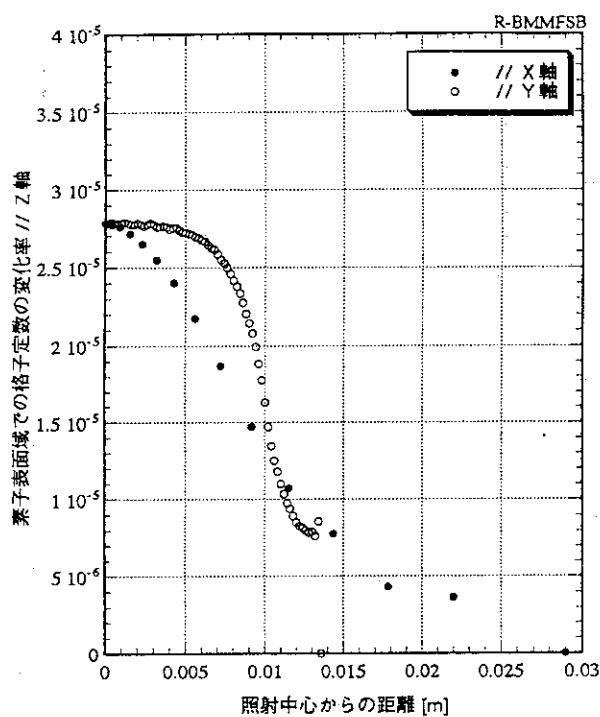


図22 a)格子定数の変化率分布
(細フィン付板、偏向電磁石、
側面底面固定)

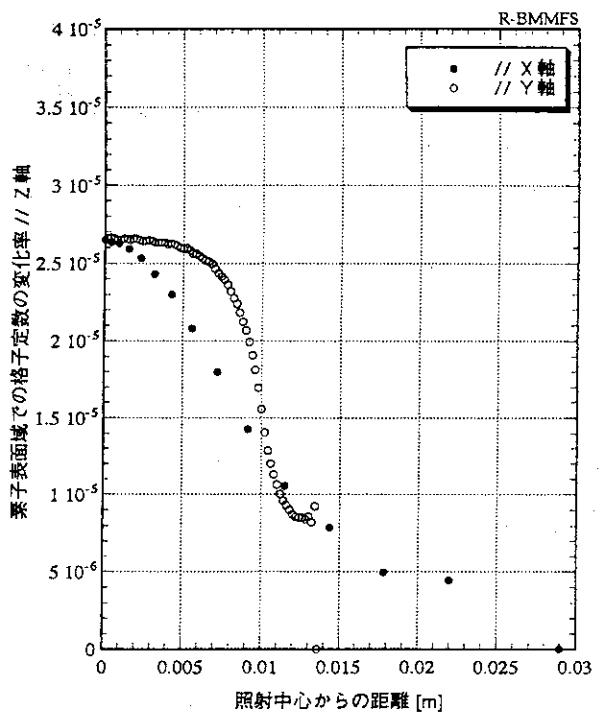


図22 b)格子定数の変化率分布
(細フィン付板、偏向電磁石、
側面固定)

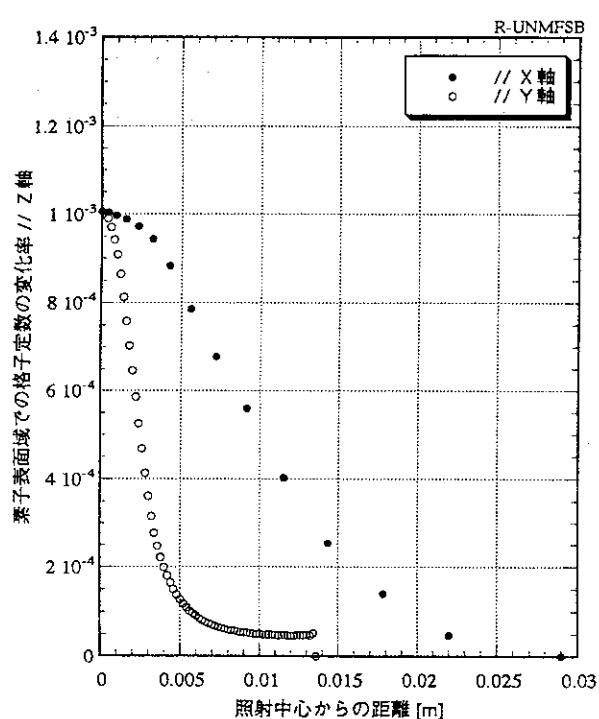


図22 c)格子定数の変化率分布
(細フィン付板、アンジュレータ、
側面底面固定)

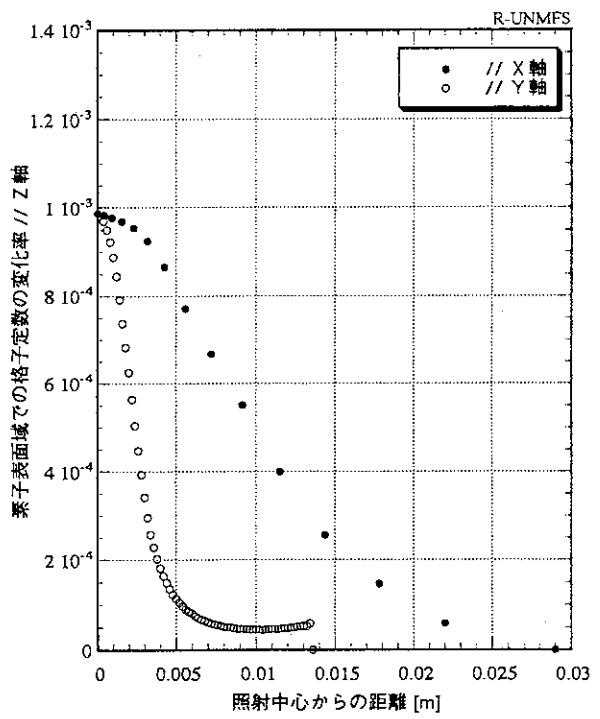


図22 d)格子定数の変化率分布
(細フィン付板、アンジュレータ、
側面固定)

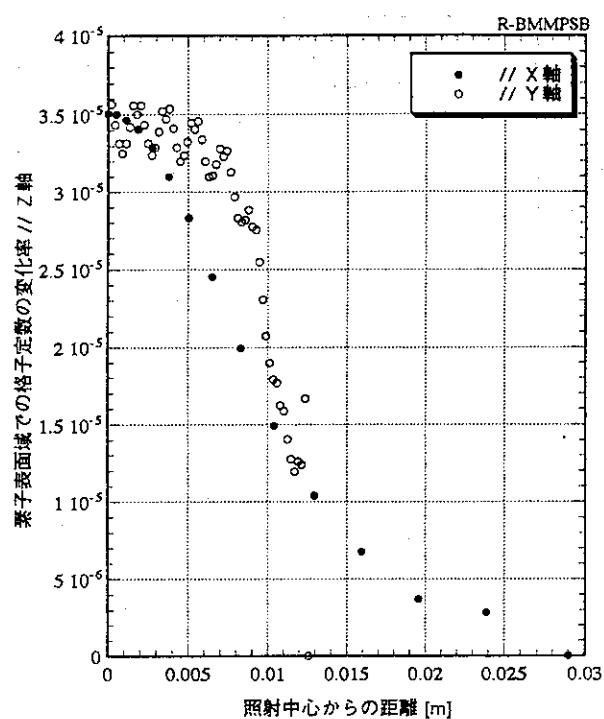


図23 a)格子定数の変化率分布
(マイクロパイプ付板、偏向電磁石、
側面底面固定)

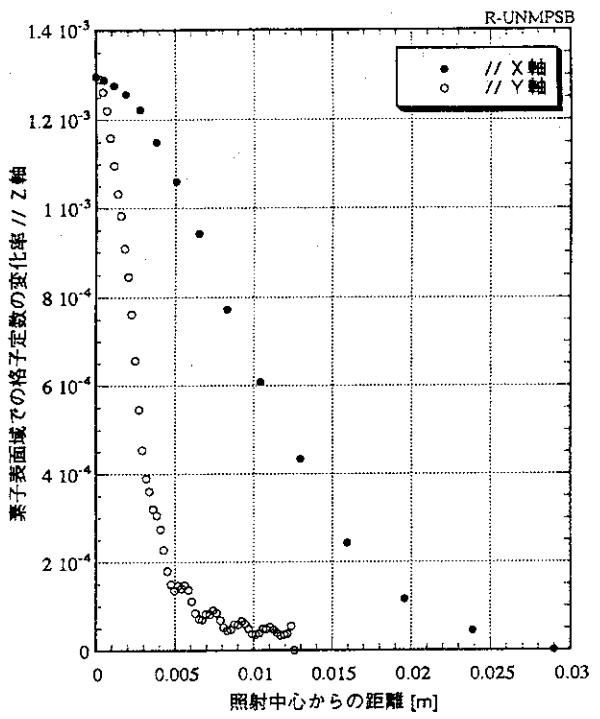


図23 b)格子定数の変化率分布
(マイクロパイプ付板、アンジュレータ、
側面底面固定)

解析モデル名	光源	応力束縛条件
粗 フィン付凹板	偏向電磁石	側面・底面
		側面
	アンジュレーター	側面・底面
		側面
細 フィン付板	偏向電磁石	側面・底面
		側面
	アンジュレーター	側面・底面
		側面
マイクロパイプ 付板	偏向電磁石	側面・底面
	アンジュレーター	側面・底面

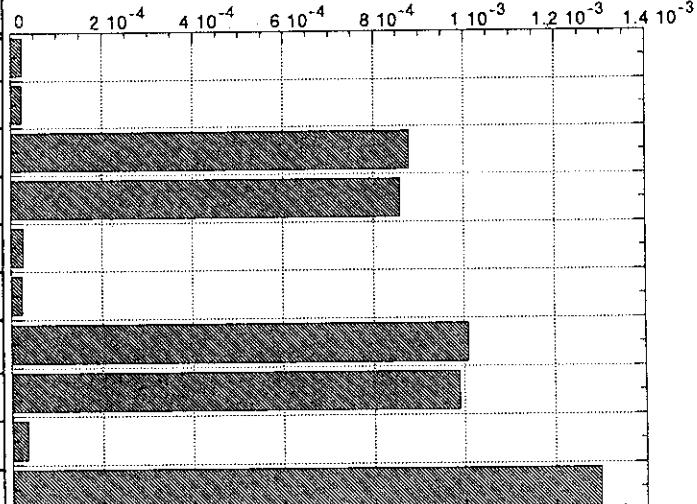


図24 各解析条件における格子定数の最大変化率

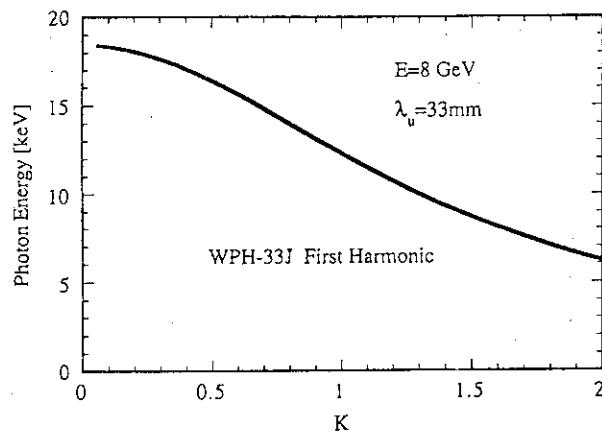


図 A1 WPH-33Jの基本波エネルギー

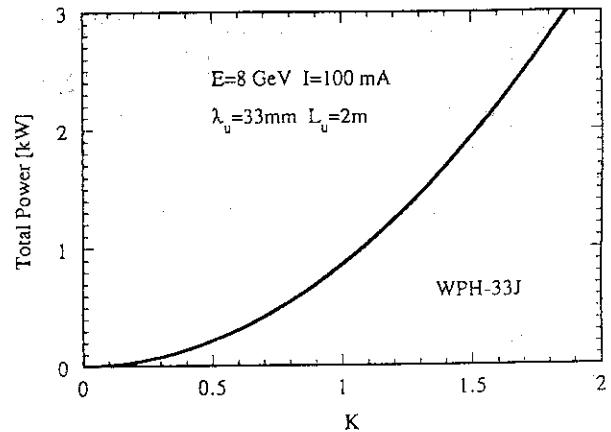


図 A2 WPH-33Jの全放射熱量

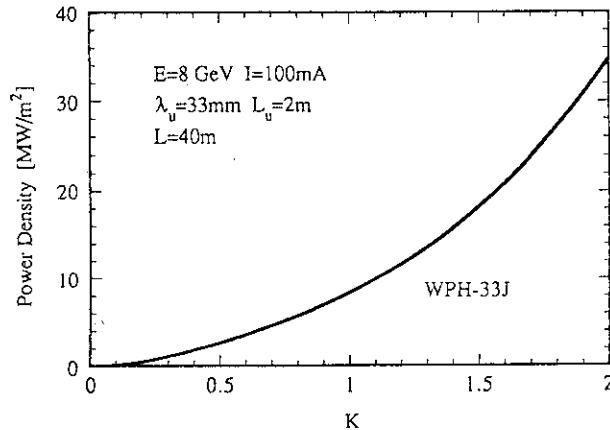


図 A3 WPH-33J、結晶表面での最大熱流束
(結晶表面の傾斜角として、1次光の
エネルギーに対応するプラック角を選んだ。)

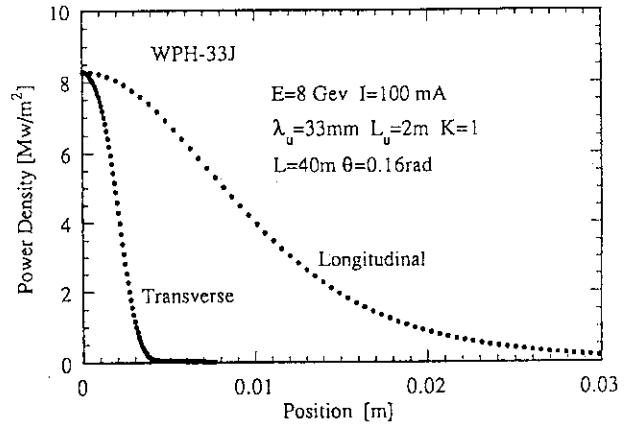


図 A4 WPH-33J、結晶表面での熱流束分布
(結晶表面の傾斜角として、1次光の
エネルギーに対応するプラック角を選んだ。)

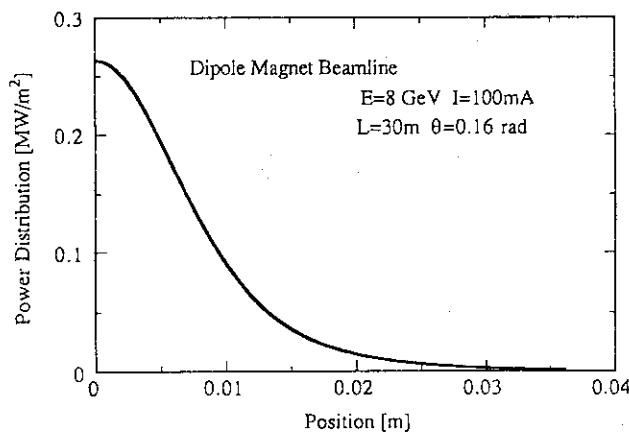


図 A5 SPring-8偏向電磁石、結晶表面での熱流束分布
(結晶表面の傾斜角は9.2[deg]とした。)

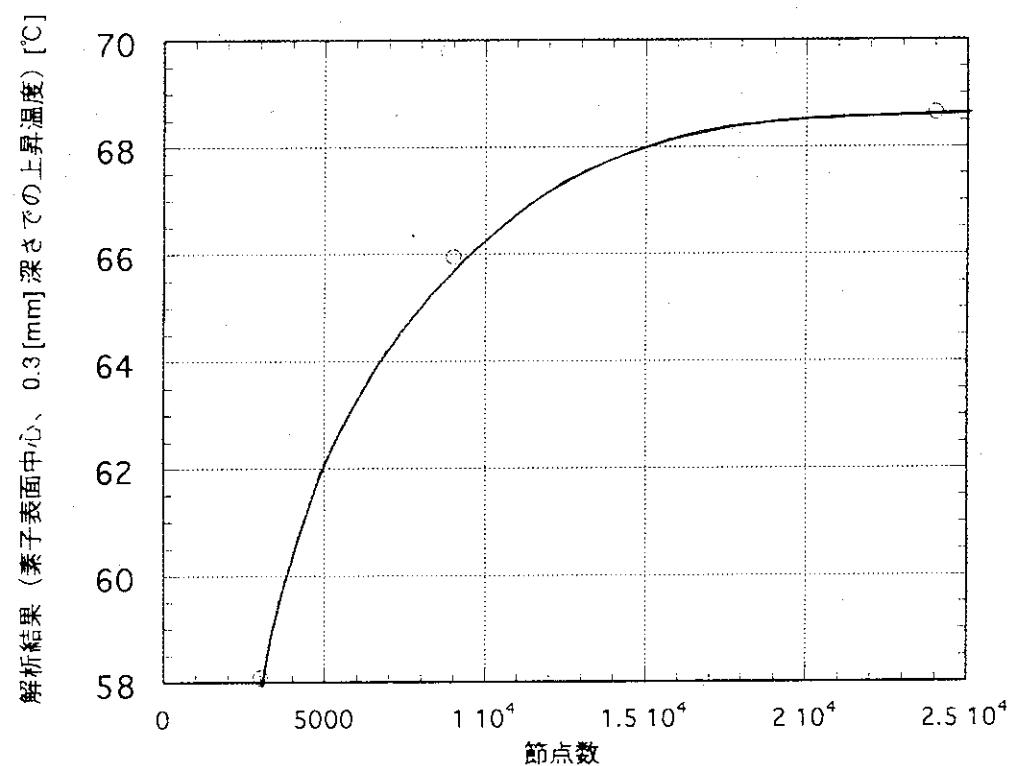


図 A6 節点数と解析結果の関係
(マイクロパイプ付板の解析モデルを用いた。)

```

/BATCH.LIST
REV:ON
***** 热解析 ファイル (bmnfh5.DAT)
***** for Ver.5.0
***** for bmnfh5.DAT

/PREP7
/title,SPRING-8 BM SI Normal-fin 1=30m Mo=.16rad Grate=1 hwa=35k
/angle,1,180,25
/view,1,-1,-0.1,-0.1
/Cu : 401 S1 : 168(at 0[C]) ! Cu : 168(at 0[C]) [W/m/deg]
mptemp,1.0,27,77,127,227,327
mpatemp,1.0,27,77,127,227,327
mpatemp,1.0,168,148,119,98,9 ! X方向热伝導率を設定
mpatemp,1.0,168,148,119,98,9 ! Y方向热伝導率を設定
mpatemp,1.0,27,77,127,227,327
mpatemp,1.0,27,77,127,227,327
mpatemp,1.0,168,148,119,98,9 ! Z方向热伝導率を設定
numrg,all,1,e-5
v,7,11,12,13,15,17,18,19 ! volume 2
surface elem ----- ! surface elem
k,20,0,0,0 ! volume 3
vdrag,4,1,19 ! line 19
numrg,all,1,e-5
v,7,11,12,13,15,17,18,19 ! volume 3
! volume 1+*3 copy -----
vgen,infl,1,3,1,0,0,dif1+wf1,
numrg,all,1,e-5
et,1,solid70,,3,,,1
eshape,0
mat,1
vmesh,all
numrg,node,1,e-5
FINISH ! 解析タイプを熱解析(PCM/Thermal)に
! 解析タイプを熱解析(PCM/Thermal)に
! set water temp 27 [C]
! set default temp 27 [C]
! boundary condition の入力 -----
! cool ----- ! cool
hwa=3,50e4 ! hcoef set
nall ! モデル表面の節点のみを選択
nfpas=0 ! Z=27.0 面上の節点のみを選択
;CO ! モデル表面の節点のみを選択
zfl0=dif1/2+nfpas*(wf1+dif1)
nsel,s,ext ! Z=27.0 面上の節点のみを選択
nsele,r,loc,z,zf11
nfpapnpa1 ! 節点に熱伝導率を設定
cvsf,all,,hwa,tw,
*IP,nfpas,LT,nfin,,c0
! nall
nfpas=0 ! モデル表面の節点のみを選択
;CL ! モデル表面の節点のみを選択
zfl1-dif1/2*dif1+nfpas*(wf1+dif1)
nsel,s,ext ! Z=27.0 面上の節点のみを選択
nsele,r,loc,z,zf11
nfpapnpa1 ! 節点に熱伝導率を設定
cvsf,all,,hwa,tw,
*IP,nfpas,LT,nfin,,c1
! nall
clocal,11,1,0,,f1cy,0,,0,,0,, ! フィンの中心
cysy,11,ext ! モデル表面の節点のみを選択
nsele,r,loc,x,zf11 ! X = 指定範囲内の節点のみを選択
nfpapnpa1 ! 節点に熱伝導率を設定
cvsf,all,,hwa,tw,
*IP,nfpas,LT,nfin,,c2
! nall
length,1,0,16 ! length to monochromator [rad]
angle,1,0,16 ! angle of incidence to monochromator [rad]
htb=1e10 ! 仮想光路 気温 Tb [deg]
htd=1.487e9 ! ? 热流束 条件 2
lesize,7,,nime,rime*2 ! line 7
lesize,7,,nime,rime*2 ! line 2
! line 5
larc,2,3,5,rafi ! 7インチ形状
lesize,2,,nime,rime*2 ! volume 1
1,1,4,nime,rime ! フィンの中心
k,6,,demo,wf1+dif1 ! フィンの中心
k,4,1,eme,demo, ! フィンの中心
k,5,,f1cy, ! フィンの中心
1,1,6,nime,1/rdme ! フィンの中心
adrag,1,1,2,3,4,,5 ! フィンの中心
numrg,all,1,e-5 ! フィンの中心
larc,2,3,5,rafi ! 7インチ形状
lesize,2,,nime,rime*2 ! volume 1
1,1,4,nime,rime ! フィンの中心
k,7,,demo,dif1/2 ! フィンの中心
k,11,1,eme,yend,dif1/2 ! フィンの中心
k,12,1,co,yend,dif1/2 ! フィンの中心
k,13,0,yend,1co,dif1/2 ! フィンの中心
k,14,,f1cy,dif1/2 ! フィンの中心
larc,7,11,14,rafi ! 7インチ形状
lesize,7,,nime,rime*2 ! line 7
lesize,7,,nime,rime*2 ! line 2

```

添付リスト 1 (bmnfh5.dat)

```

qrat=1.0          ! ? ration of power
*CREATE,Bnheat
ho=qrat*arg2/(lemo**2)*sin(mora)
hqTb=hq/hTb
cvsf,all,,,hqTb,hTb,
nail
nse1,s,loc,y,0
nse1,r,loc,x,0,hqxe
nse1,r,loc,z,0,10e-3
enode,0
nelem
nse1,r,loc,y,0
nse1,r,loc,x,0,hqtb,hTb,
*END
*****画面表示設定*****
!全節点を選択
!要素の番号を表示しない
!コンター値を表示
!熱伝導係数を表示
!等温気温度を表示
!解析計算開始
nail
/pnum, elem,0
/pnum, sva,1
/bsf, conv, bcoef,1
/psf, conv, tbulk,1
:crys,0
!SAVE
!SOLVE
!FINISH
*****解説*****
!*****解説*****
```

!*****解説*****

```

*USE,bnheat,1,64798E-04,1,48648E+07
*USE,bnheat,1,60366E-04,1,64209E-07
*USE,bnheat,1,57133E-04,1,81697E-07
*USE,bnheat,1,53301E-04,2,0138E-07
*USE,bnheat,1,49468E-04,2,2358E+07
*USE,bnheat,1,45636E-04,2,48655E+07
*USE,bnheat,1,41803E-04,2,77028E+07
*USE,bnheat,1,37971E-04,3,09192E-07
*USE,bnheat,1,34133E-04,3,45714E+07
*USE,bnheat,1,30368E-04,3,8728E+07
*USE,bnheat,1,26473E-04,4,34593E-07
*USE,bnheat,1,22641E-04,4,9832E+07
*USE,bnheat,1,18805E-04,5,506E+07
*USE,bnheat,1,14143E-04,6,21125E+07
*USE,bnheat,1,11111E-04,7,02222E+07
*USE,bnheat,1,07311E-04,7,95337E+07
*USE,bnheat,1,03478E-04,9,23795E-07
*USE,bnheat,1,00645E-05,1,-02558E+07
*USE,bnheat,1,-36456E-05,1,-02558E+07
*USE,bnheat,1,-98456E-05,1,-02558E+07
*USE,bnheat,1,-16805E-05,1,-16711E-08
*USE,bnheat,1,-23805E-05,1,-21522E-08
*USE,bnheat,1,-30805E-05,1,-28179E-08
*USE,bnheat,1,-37805E-05,1,-35088E+08
*USE,bnheat,1,-44805E-05,1,-41948E+08
*USE,bnheat,1,-51805E-05,1,-48623E+08
*USE,bnheat,1,-58805E-05,1,-55622E+08
*USE,bnheat,1,-66504E-05,2,-27363E+08
*USE,bnheat,1,-728179E-05,2,-60357E+08
*USE,bnheat,1,-788545E-05,2,-98122E+08
*USE,bnheat,1,-848228E-05,3,-90133E+08
*USE,bnheat,1,-908228E-05,4,-45368E+08
*USE,bnheat,1,-968228E-05,5,-07198E+08
*USE,bnheat,1,-1028228E-05,6,-51242E+08
*USE,bnheat,4,21577E-05,7,-32922E+08
*USE,bnheat,3,83252E-05,8,19965E+08
*USE,bnheat,3,44922E-05,9,11054E+08
*USE,bnheat,3,066025E-05,1,00424E+09
*USE,bnheat,2,662277E-05,1,09706E+09
*USE,bnheat,2,299515E-05,1,18663E+09
*USE,bnheat,1,91626E-05,1,26988E+09
*USE,bnheat,1,53301E-05,1,3434E+09
*USE,bnheat,1,149765E-05,1,40424E+09
*USE,bnheat,7,66504E-06,1,44975E+09
*USE,bnheat,3,83252E-06,1,4779E+09
!
```

!Reset Max heatload(0.281618e-6) in Z axis

```

!nail
enail
nse1,s,loc,x,0,
nse1,r,loc,y,0,
enode,0
nelem
nse1,r,loc,y,0
```

```

/BATCH_LIST
REV.4.0N
***** 効力解析ファイル (NFSB5.DAT) *****
***** for Ver.5.0 *****

title, SPRing-8 S1 Normal-Fin (Side & Bottom FIX) ! FILE,DB(PREP7 の状況) 試み込み
/RESUME
/PREP7
nall
crys,0
et,1,solid45,
etlist
***** ヤンゲ率定 *****
mp,ey,1,yang
mp,ez,1,yang
!----- 黑體強係數 (温度依存あり)
! Cu : 1.6e-6 [K^-1] - 3.9e-6(at 427[C]) [K^-1]
! Si : 2.2e-6(at -23[C]) - 3.9e-6(at 427[C])
mp,temp,1,-23,20,-127,227,427,427
mp,data,alpx,1,1,2,2e-6,2,6e-6,3,2e-6,3,5e-6,3,7e-6,3,9e-6 ! 材料番号1のX方向熱
mp,temp,1,-23,20,127,227,327,427,427
mp,data,alpy,1,1,2,2e-6,2,6e-6,3,2e-6,3,5e-6,3,7e-6,3,9e-6 ! 材料番号1のY方向熱
mp,temp,1,-23,20,127,227,327,427
mp,data,alpz,1,1,2,2e-6,2,6e-6,3,2e-6,3,5e-6,3,7e-6,3,9e-6 ! 材料番号1のZ方向熱
!----- #アソシエーション比
mat=0.278
mp,nuxy,1,1,1,1
mp,nuyz,1,1,1,1
mp,nuzx,1,1,1,1
mp,prxy,1,1,1,1
mp,pryz,1,1,1,1
mp,prxz,1,1,1,1
!----- 解析タイプ設定
xend=1,eme
yend=1,1e-3
zend=1,4e-3
FINISH
!----- 解析タイプ設定
/SOLUTION
nall
antype,static
ldread,temp,...,file,rth,g;
tw=27
tref,tw
!----- モデル対称面 (X=0) -----
nall
nset,s,ext
nset,r,loc,x,0
d,all,ux,0
!----- モデル表面 (Z=0) -----
nall
nset,s,ext
nset,r,loc,z,0
d,all,uz,0
!----- 側面 (X=xend) -----
nall
nset,s,ext

```

添付リスト2 (nfsb5.dat)

```

***** POSTSS, BAT *****
! 応力解析後の解析結果を処理する準備。
/batch.list
/RESUME
/posti
file,FILE,RST,6:
set
***** FILE DB(PREP7の状況) 読み込み
! フィストモードへ移行
! 応力解析結果ファイル(FILE.RST) 読み込み
/nall
nsel,s,loc,y,-1e-10,1e-10
nsel,r,loc,z,-1e-10,1e-10
/output,xplace,dat,c;
nlist
/prnsol,u,comp
/output,xtemp,dat,c;
/prnsol,bfe,temp
/output,
!
===== Z-AXIS =====
nall
nsel,s,loc,x,-1e-10,1e-10
nsel,r,loc,y,-1e-10,1e-10
/output,zplace,dat,c;
nlist
/prnsol,u,comp
/output,ztemp,dat,c;
/prnsol,bfe,temp
/output,
!
===== XY-FACE =====
nall
nsel,s,loc,z,-1e-10,1e-10
/output,xyplace,dat,c;
nlist
/prnsol,xydisp,dat,c;
/prnsol,u,comp
/output,xytemp,dat,c;
/prnsol,bfe,temp
/output,
!
===== YZ-FACE =====
nall
nsel,s,loc,x,-1e-10,1e-10
/output,yzplace,dat,c;
nlist
/prnsol,uydisp,dat,c;
/prnsol,u,comp
/output,uytemp,dat,c;
/prnsol,bfe,temp
/output,
!

```

添付リスト 3 (post 5s.dat)

添付リスト 4 (dtout.dat)

```

/BATCH LIST
REV4,ON
***** 热解フアノル (UNMPH5.DAT) *****
***** for Ver.5.0 *****
***** *****
***** *****
angle,1,180,zs
/ttitle,SPRING-8 WPH-33] SI Micro-pipe l=40m Mo=.16rad Qrate=1 hwa=14K
/View,1,-1,-0,1
Cu : 401 : S1 : 168 at 0[C] (W/m/deg)
mptemp,1.0,27,77,127,227,327
mpdata,kxx,1,1,168,148,119,98,9,76,2,61,9 ! 材料番号1のX方向热伝導率を設定
mpdata,kyy,1,1,168,148,119,98,9,76,2,61,9 ! 材料番号1のY方向热伝導率を設定
mpdata,kzz,1,1,168,148,119,98,9,76,2,61,9 ! 材料番号1のZ方向热伝導率を設定
mpdata,lld,0,0009
length (m) ----
1wh=0.0009
lrb=0.00075
lds=0.0005
ldh=0.0016
lhd=0.0016
ld3=0.0016
ldh=0.00495
lwd=0.029
lwh=0.0018
nfln=8
===== number of mesh =====
zlds=0.8
zld=0.2
inwl=7
nwdl=4
nlds=3
al=1
al2=5
al2=8
al3=2
nll=5
===== rate of mesh =====
rwd=10
volume ----- main -----
----- volume -----
k.1,0,0,0
k.2,0,0,1wh*2
k.3,0,1ds+2lds,1wh*2
k.4,0,1ds+2lds,0
k.5,0,1ds+1rlt,0
k.6,0,1ds+1rlt,1wh*2
k.7,0,(1dh1-lrh)/1.5*lds+1rlh,0
k.8,0,(1dh1-lrh)/1.5*lds+1rlh,1wh*2
k.9,0,(1dh2-lrh)/3*lds+1rlh,1dh1-lrh,0
k.10,0,(1dh2-lrh)/3*lds+1rlh,1dh1-lrh,1wh*2
k.11,0,1ds+1rlh,1dh1-ldh2,0
k.12,0,1ds+1rlh,1dh1-ldh2,1wh*2
k.13,0,(1dh3-lrh)/1.5*lds+1rlh,1dh1-ldh2,1wh*2
k.14,0,(1dh3-lrh)/1.5*lds+1rlh,1dh1-ldh2,1wh*2
k.15,0,1ds+1rlh,1wh
k.21,1rn,lds+1rlh,1wh
k.22,1rh,lds+1rlh,1dh1,0
k.17,0,1ds+1rlh,1dh1,0
k.23,-1rh,lds+1rlh,1wh*2

```

添付リスト5 (unmpf5.dat)

```

!k key=66.0 lds=1rlhd1hd1*1dh3*1dh4_1wh*4*(nfin-1)*2*1wh
!a key+1, key+2, key+3, key+4
!a key+4, key+5, key+6, key+7
!a key+29, key+3, key+6, key+30
!a key+5, key+27, key+32, key+7
!a key+30, key+6, key+8, key+31
!a key+32, key+31, key+48, key+34
!a key+7, key+32, key+34, key+43
!a key+31, key+8, key+47, key+48
!a key+34, key+48, key+49, key+35
!a key+15, key+49, key+39, key+38
!a key+36, key+35, key+38, key+39
!a key+49, key+50, key+10, key+39
!a key+9, key+10, key+12, key+40
!a key+39, key+11, key+12, key+41
!a key+42, key+12, key+14, key+41
!a key+40, key+12, key+37, key+41
!a key+11, key+37, key+42, key+13
!a key+16, key+17, key+43, key+44
!a key+13, key+42, key+44, key+43
!a key+41, key+14, key+51, key+52
!a key+44, key+52, key+53, key+45
!a key+45, key+53, key+54, key+24
!a key+53, key+54, key+24, key+26
!a key+46, key+45, key+45, key+25
!a key+47, key+51, key+54, key+49
!a key+52, key+51, key+54, key+53
!a key+50, key+55, key+56, key+3
!a key+3, key+56, key+57, key+6
!a key+6, key+57, key+58, key+8
!a key+8, key+58, key+59, key+47
!a key+47, key+59, key+60, key+50
!a key+50, key+60, key+61, key+10
!a key+10, key+61, key+62, key+12
!a key+12, key+62, key+63, key+14
!a key+3, key+63, key+64, key+51
!a key+51, key+64, key+65, key+54
!a key+54, key+65, key+66, key+24
!lesize, lie+20..., nids,
!lesize, lie+22..., nids,
!lesize, lie+75..., nids,
!lesize lie+64..., n11.5
!lesize, lie+66..., n11.1/5
!lesize, lie+88..., n11.5
!lesize, lie+71..., n11.1/5
!lesize, lie+35..., n11.5
vdrag, arc+1, are+2, are+3, are+4, are+5, are+6, 7, 73,
vdrag, arc+7, are+8, are+9, are+10, are+11, are+12, 73,
vdrag, arc+13, are+14, are+15, are+16, are+17, are+18, 73,
vdrag, arc+19, are+20, are+21, are+22, are+23, are+24, 73,
vdrag, arc+25, are+26, are+27, are+28, are+29, are+30, 73,
vdrag, arc+31, are+32, are+33, are+34, are+35, are+36, 73,
=====
MESHING =====
nummg, kpol, 1, e-6
et, 1, solid0, 3, . . .
estshape, a
estshape, 0
mesh, all
nall
FINISH
!
```

```

/SOLUTION
antype static
tw,27
tunf,tw
!----- 構造条件の入力 -----
!----- 境界条件の入力 -----
!----- 人工 -----
hwa=1.40e4
!----- B1F -----
nall
n=1
:c1
z1-lwh*2*n-lwh
clocal,11,1,0,1ds+lrh,z1,0,90,0,
csy,11
nse1,s,loc,x,lrh-1.0e-5,lrh+1.0e-5,
cvsf,all,,hwa,tw
n=n+1
csys,0
*if,n,lt,ntfin,:c1
!----- B2F -----
nall
eall
n=1
:c2
z1-lwh*2*n-2*lwh
clocal,11,1,0,1ds+lrh+dhl,z1,0,90,0,
csy,11
nse1,s,loc,x,lrh-1.0e-6,lrh+1.0e-6,
cvsf,all,,hwa,tw
n=n+1
csys,0
*if,n,lt,ntfin+:c2
!----- B3F -----
nall
eall
n=1
:c3
z1-lwh*2*n-2*lwh
clocal,11,1,0,1ds+lrh+1dh1+1dh2,z1,0,90,0,
csy,11
nse1,s,loc,x,lrh-1.0e-6,lrh+1.0e-6,
cvsf,all,,hwa,tw
n=n+1
csys,0
*if,n,lt,ntfin,:c3
!----- B4F -----
nall
eall
n=1
:c4
z1=lwh*2*n-2*lwh
clocal,11,1,0,1ds+lrh+1dh1+1dh2+1dh3,z1,0,90,0,
csy,11
nse1,s,loc,x,lrh-1.0e-6,lrh+1.0e-6,
cvsf,all,,hwa,tw
n=n+1
csys,0
*if,n,lt,ntfin+:c4
!----- undulator beam -----
lemo=40
!----- length to monochromator
!----- angle to monochromator [rad]
!----- 仮想穿孔気温度 Tb [deg]
!----- 熱流束乗数 [W/ m^2]
!----- ration of power
!----- CREATE,BMheat
!----- 全節点を置換
!----- 要素の番号を表示しない
!----- コンクーラー値を表示
!----- 熱伝導係数を表示
!----- 対開気温度を表示
!----- 解析計算開始
CSYS,0
!----- 画面表示設定 -----
!----- 全節点を置換
!----- 要素の番号を表示しない
!----- コンクーラー値を表示
!----- 熱伝導係数を表示
!----- 対開気温度を表示
!----- Reset Max heatload in elem 1
!----- UN data -----
*USE,bmheat,7.87583E-05,8.3146E+09*1.50
*USE,bmheat,7.01352E-05,6.36199E-05,1.64337E+09*1.40
*USE,bmheat,6.36199E-05,5.32721E-05,2.48818E+09*1.40
*USE,bmheat,5.80622E-05,4.34151E-05,3.32034E+09*1.30
*USE,bmheat,5.28888E-05,3.89010E-05,4.13375E-05,5.99004E+09*1.20
*USE,bmheat,4.73316E-05,3.29597E-05,4.99004E+09*1.15
*USE,bmheat,4.15829E-05,2.72105E-05,5.86238E+09*1.05
*USE,bmheat,3.49327E-05,2.14621E-05,6.19191E+09*1.05
*USE,bmheat,2.5103E-05,1.48336E-05,7.48352E+09*1.05
*USE,bmheat,1.91628E-07,1.31628E-07,8.32174E+09*1.00
!----- hq=grat8.32174E+10/(lemo**2)*sin(mora)
hqTB=hqTB,
cvsf,all,,hqtB,hTB,
nall
eall
!----- 全節点を置換
!----- 要素の番号を表示しない
!----- コンクーラー値を表示
!----- 熱伝導係数を表示
!----- 対開気温度を表示
!----- 解析計算開始
CSYS,0
!----- SAVE
!----- FINISH
!----- SOLVE

```