

光学エレメントの配置ずれによる光学性能への影響の把握
～ANSYS FLUENT - ANSYS Mechanical - CODE V - OPTIMUS
連成解析によるロバスト設計～

サイバネットシステム株式会社
メカニカルCAE事業部
応用システム事業部 オプティカルソリューション部
アドバンスドソリューション統括部 PIDO室

サイバネットシステム株式会社

CYBERNET 解析概要

➤ **問題点**

- ✓ 光学機器の高密度化/密封化が進むことで、熱膨張による光学エレメントの配置ずれが大きくなり、結果として光学性能が低下することが懸念されます。

➤ **CODE Vを用いた環境変化オプションについて**

- ✓ CODE Vの環境変化オプションを用いることでレンズの熱膨張を考慮出来ませんが、筐体に起こる熱変形に起因した光学エレメントの配置ずれや複雑な温度分布の影響は考慮することはできません。
- ✓ このためこれらを考慮した熱解析を行うためには、外部ソフトウェアと連携してのシミュレーションが必要になります。

➤ **ANSYS FLUENT-ANSYS Mechanical-CODE V-OPTIMUS連成解析**

- ✓ 本事例では熱変形の問題を解決する方法として、ANSYS FLUENT-ANSYS Mechanical-CODE V-OPTIMUS連成解析によるロバスト設計手法をご提案致します。

＜＜実施内容＞＞

- ・ ANSYS FLUENT/ANSYS Mechanicalを用いた熱流体の影響を加味した各光学エレメントの配置ずれの把握
- ・ ANSYSの計算結果をもとに、光学エレメントの配置ずれによる光学性能への影響をCODE Vで計算
- ・ ロバスト設計の実施
- ・ 最適設計支援ツールOPTIMUSを用いた全解析工程の自動化

CYBERNET 解析ワークフローの概要

- 以下の解析フローにより熱ひずみを加味した光学設計を実施



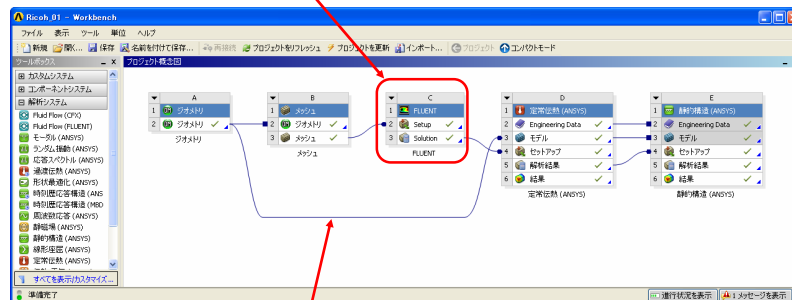
© 2009 CYBERNET SYSTEMS CO.,LTD. All Rights Reserved.

3

CYBERNET ANSYS Workbench12.0を用いた解析ワークフロー

- 同一プラットフォーム上で各種解析のデータの関連付けを実施可能

流体モジュール(ANSYS FLUENT or ANSYS CFX)



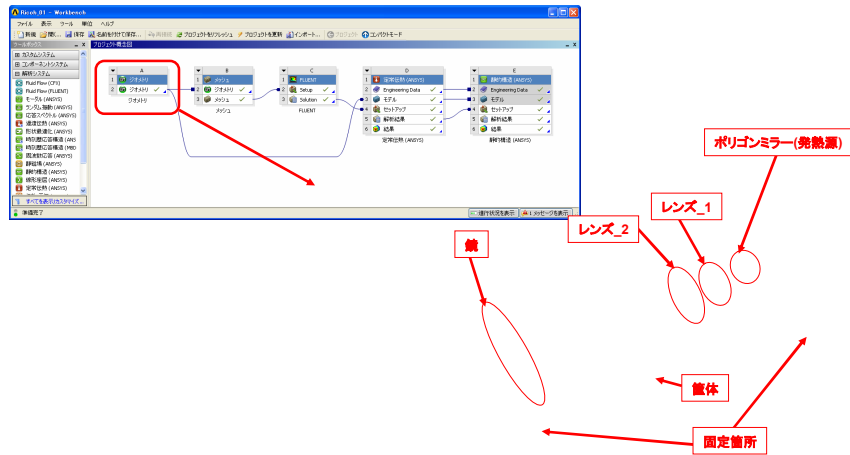
各モジュール間のデータの流れを示しています。
 (例1)ジオメトリ⇒メッシング⇒流体解析へのデータ転送
 (例2)流体解析⇒熱応力解析への温度荷重転送

© 2009 CYBERNET SYSTEMS CO.,LTD. All Rights Reserved.

4

CYBERNET ①ジオメトリ作成(ANSYS DesignModeler) -プロジェクト概要-

- CODE Vのレンズ設計情報を元にANSYS DesignModelerにてジオメトリを作成



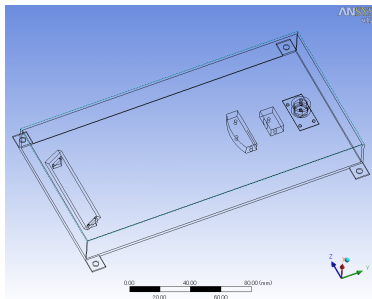
© 2009 CYBERNET SYSTEMS CO.,LTD. All Rights Reserved.

5

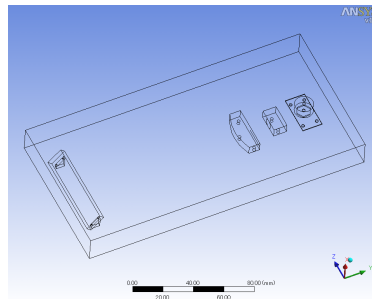
CYBERNET ①ジオメトリ作成(ANSYS DesignModeler) -ジオメトリ概要-

- ANSYS DesignModelerを用いてジオメトリを作成

【構造領域】



【流体領域】



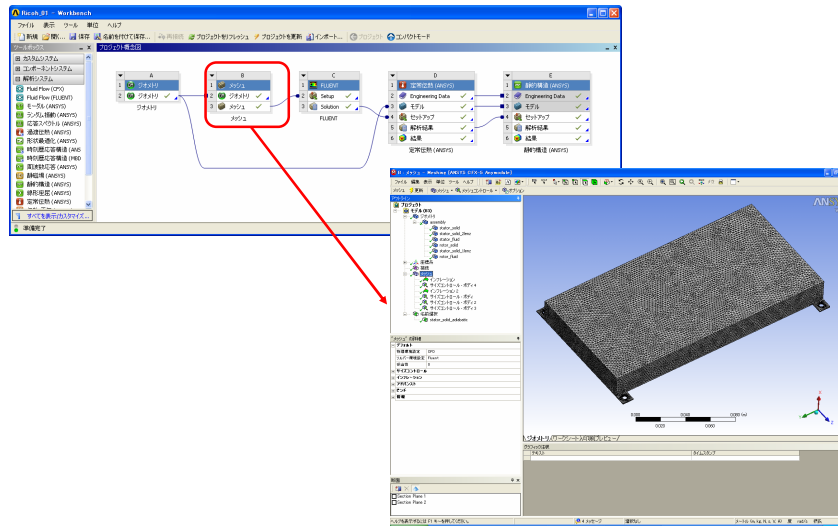
CADデータを流用することも可能です。今回のモデルでは流体領域/構造領域を同時に作成し、解析内容に応じて使い分けております。

© 2009 CYBERNET SYSTEMS CO.,LTD. All Rights Reserved.

6

CYBERNET ②メッシュ作成(ANSYS Meshing) -プロジェクト概要-

➤ ANSYS Meshingを用いて流体解析用メッシュを作成



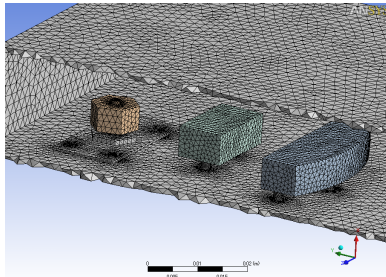
© 2009 CYBERNET SYSTEMS CO.,LTD. All Rights Reserved.

7

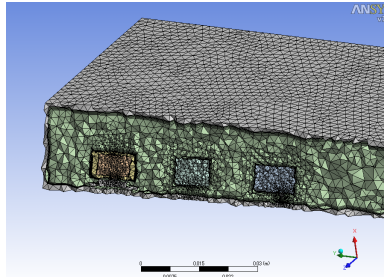
CYBERNET ②メッシュ作成(ANSYS Meshing) -メッシュ概要-

➤ ANSYS Meshingを用いて流体解析用メッシュを作成

【固体領域】



【固体/流体領域】



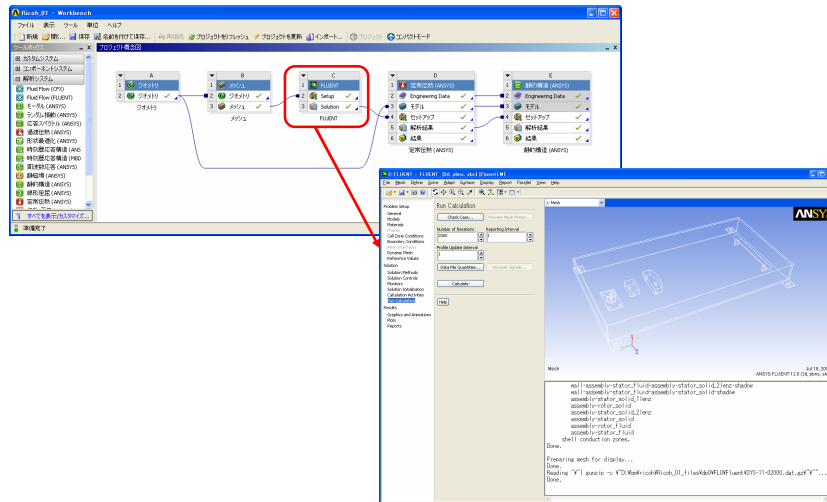
流体領域の境界層にはレイヤーメッシュ(積層メッシュ)を作成

© 2009 CYBERNET SYSTEMS CO.,LTD. All Rights Reserved.

8

CYBERNET ③流体解析を実施(ANSYS FLUENT) -プロジェクト概要-

➤ ANSYS FLUENTによる流体解析を実施



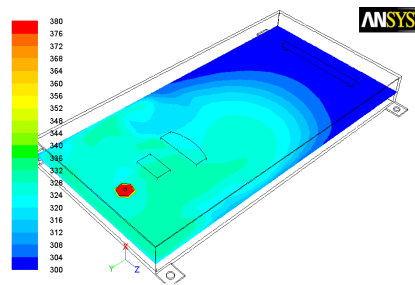
© 2009 CYBERNET SYSTEMS CO.,LTD. All Rights Reserved.

9

CYBERNET ③流体解析を実施(ANSYS FLUENT) -流体解析結果概要-

➤ ANSYS FLUENTによる流体解析を実施

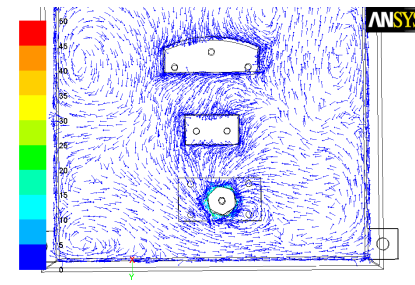
【温度分布】



Profiles of Static Temperature (K)

Jul 19, 2009
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, ske)

【ベクトル図(Fixed Lengthオプション使用時)】



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

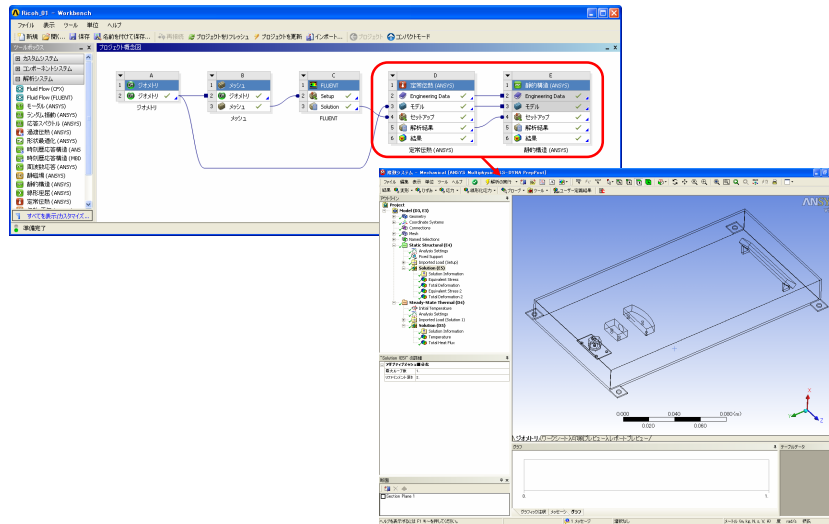
Jul 19, 2009
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, ske)

© 2009 CYBERNET SYSTEMS CO.,LTD. All Rights Reserved.

10

CYBERNET ④熱応力解析を実施(ANSYS Mechanical) -プロジェクト概要-

➤ ANSYS Mechanicalを用いて熱応力解析を実施



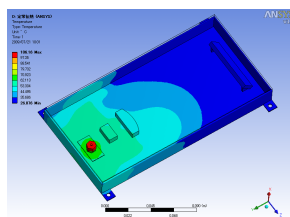
© 2009 CYBERNET SYSTEMS CO.,LTD. All Rights Reserved.

11

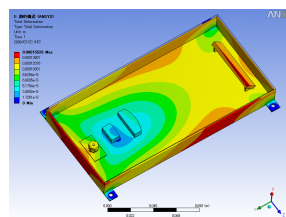
CYBERNET ④熱応力解析を実施(ANSYS Mechanical) -熱応力解析結果概要-

➤ ANSYS Mechanicalを用いて熱応力解析を実施

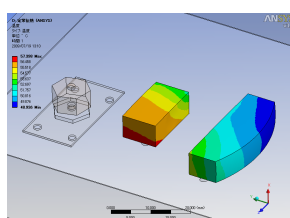
【温度分布(全体)】



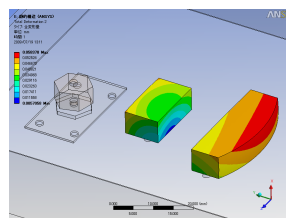
【変位量(全体)】



【温度分布(レンズのみ)】



【変位量(レンズのみ)】



© 2009 CYBERNET SYSTEMS CO.,LTD. All Rights Reserved.

12

CYBERNET ⑤光学設計解析を実施(CODE V)

➤ ANSYS Mechanicalの計算結果をCODE Vに出力

■ ANSYS Mechanicalからの出力項目:

- ・各レンズ面の平行移動量(重心の移動量)
- ・各レンズ面のOXベクトルとOYベクトルを出力
(ベクトルの変化によりレンズの回転を表現(レンズは剛体と仮定※1))



テキストファイルの内容を出力し、CODE V入力フォーマットに編集※2

■ CODE Vへの入力項目:

- ・各レンズ面の平行移動量(重心の移動量)と
- ・面の回転を回転角(α, β, γ)により表現

※1 : 筐体の変形量と比べ、レンズそのものの変形量は非常に小さいため、レンズは剛体として仮定します。
※2 : "ANSYS Mechanicalからデータを出力するためのマクロ"と"出力されたデータをCODE Vフォーマットに変換するためのマクロ"の2つを使用します(マクロの詳細につきましては、資料後半の補足をご参照下さい)。

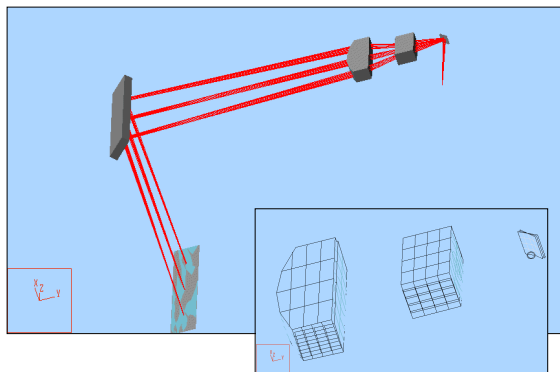
CYBERNET ⑤光学設計解析を実施(CODE V)

➤ CODE Vによる光学性能解析:

設計データと熱変形後のデータについて、CODE Vにて光学性能の比較解析を行います

以下のような評価解析項目が挙げられます

- ・ RMSスポット径
- ・ スポット形状
- ・ スポットの均一性
- ・ スキャン線形性($f\theta$ 特性)

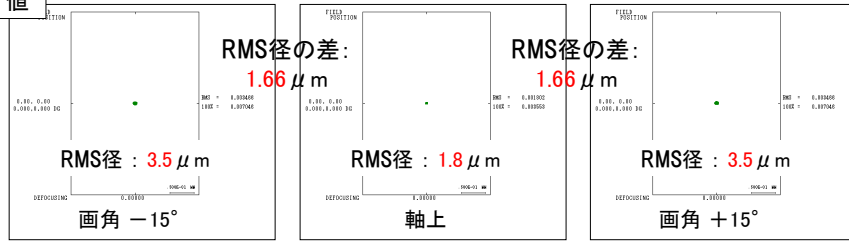


レンズ部 拡大図

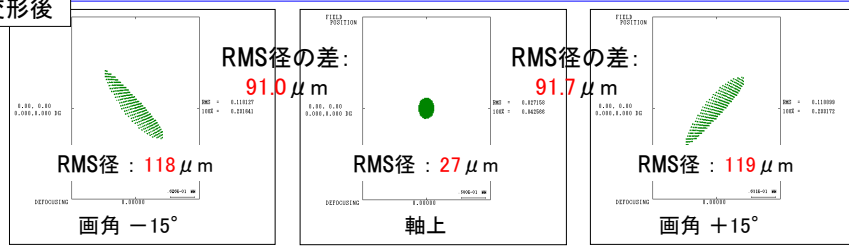
CYBERNET ⑤光学設計解析を実施(CODE V)

➤ CODE Vによる光学性能解析 —スポットダイアグラム—

設計値



熱変形後



© 2009 CYBERNET SYSTEMS CO.,LTD. All Rights Reserved.

15

CYBERNET ⑤光学設計解析を実施(CODE V)

➤ CODE Vによる熱変形を見越した光学設計

✓ 熱変形により、光学性能は劣化します。この熱変形を見越して、変形前後の性能変動量を最小化し、熱変形に対してロバスト性の高い系となるように以下の手順でモデルの再設計を行います

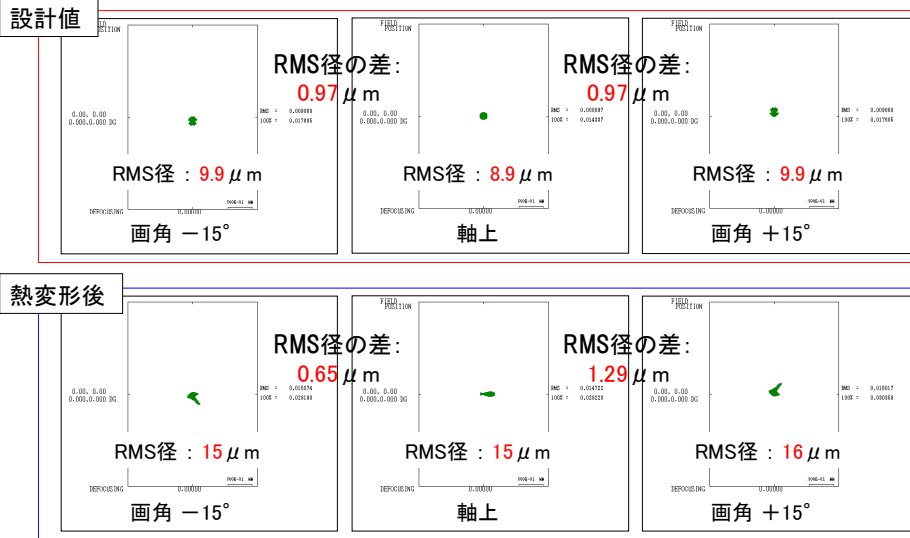
- 設計データにズームポジションを追加し、熱変形後の光学系のデータを定義します
- 面の形状だけを最適化変数として、全ズームポジションについて最適化を実行します
 - ・ 今回は、画角ごとの最適化補正ウェイトでスポット径をコントロールしています
 - ・ スポット形状の均一性および変形前後でのRMSスポット径の変動を抑えるように、より厳密な最適化制約条件を与えることもできます

© 2009 CYBERNET SYSTEMS CO.,LTD. All Rights Reserved.

16

CYBERNET ⑤光学設計解析を実施(CODE V)

➤ 再設計後の光学性能解析 —スポットダイアグラム—



CYBERNET ⑥OPTIMUSによるANSYS/CODE Vの統合環境構築

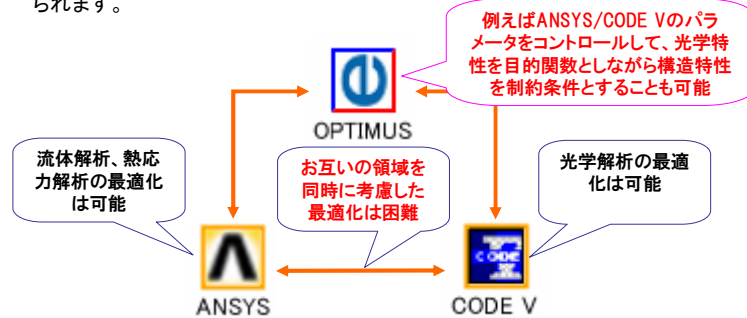
➤ 最適設計支援ツールOPTIMUSにより、ANSYS/CODE Vの解析環境を統合化し、様々なアプローチによる効率的な複合領域最適化を実現することができます。

- ✓ **自動化・統合化**：ANSYSおよびCODE V専用インターフェースにより一連の解析作業を容易に自動化し、夜間や休日などの時間帯を有効利用することができます。
- ✓ **最適化・設計空間の分析**：CODE Vの最適化機能のほか、OPTIMUSの豊富な最適化アルゴリズムを利用して流体-熱応力-光学の複合領域最適化を実現することができます。実験計画法や応答曲面法により変数間の関係性を把握するなど、問題分析を行うことができます。
- ✓ **ロバスト性・信頼性解析**：寸法や物性値など、バラツキを考慮した最適化を実現し、出力性能のバラツキが小さく失敗確率の低い最適解を探索することができます。

CYBERNET ⑥OPTIMUSによるANSYS/CODE Vの統合環境構築

➤ 複合領域(流体-熱応力-光学)最適化の必要性

- ✓ ANSYSおよびCODE Vはそれぞれ最適化機能を有しており、それぞれの解析において単独の最適化を行うことが可能です。
- ✓ しかしながら、お互いのパラメータをコントロールしたり、それぞれの出力値を目的関数/制約条件として考慮することは困難です。
- ✓ 例えば光学特性を重視した結果、構造特性が充分でなくなるなどの問題が考えられます。



- ✓ OPTIMUSによりANSYSとCODE Vの解析環境を統合化することにより、両者のパラメータや出力値を自由にコントロールし、複合領域の最適化を実現することができます。

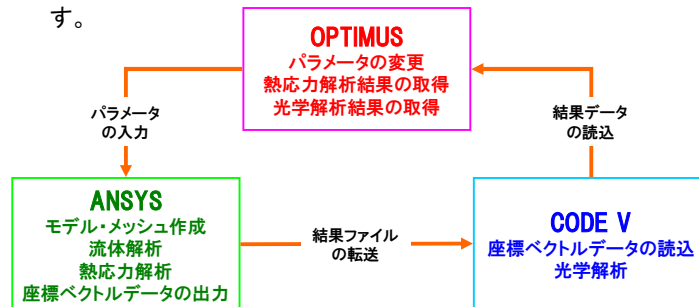
© 2009 CYBERNET SYSTEMS CO.,LTD. All Rights Reserved.

19

CYBERNET ⑥OPTIMUSによるANSYS/CODE Vの統合環境構築

➤ OPTIMUSによりANSYS-CODE V連成解析の統合環境を構築します。

- ✓ ANSYS内のパラメータを変更しながら一連の解析を自動的に繰り返し計算することができ、様々な最適化アプローチを適用することができます。



OPTIMUSと連携するための条件：ソルバーの入出力ファイルがテキスト形式で、ソルバーがバッチ実行可能であること。
(バイナリ形式の場合、別途インタフェースを提供)

パラメータについて
ANSYS Workbench：寸法、材料物性値(ヤング率、線膨張係数...)など
CODE V：寸法、材料物性値(屈折率...)など

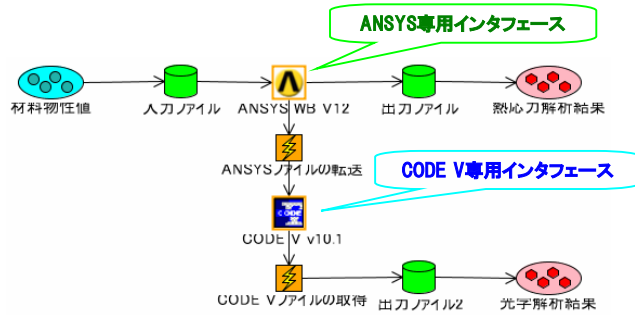
© 2009 CYBERNET SYSTEMS CO.,LTD. All Rights Reserved.

20

CYBERNET ⑥OPTIMUSによるANSYS/CODE Vの統合環境構築

➤ 自動化の例

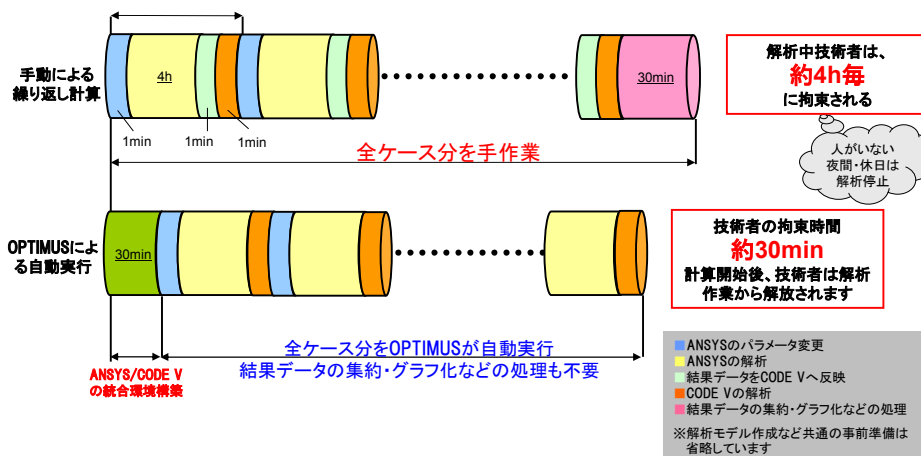
- ✓ ANSYS内で筐体のヤング率、線膨張係数をパラメータ化し、ANSYS—CODE Vの解析実施後のRMSスポット径を取得します。
- ✓ OPTIMUSの解析シーケンス(データフロー)



CYBERNET ⑥OPTIMUSによるANSYS/CODE Vの統合環境構築

➤ 自動化の例

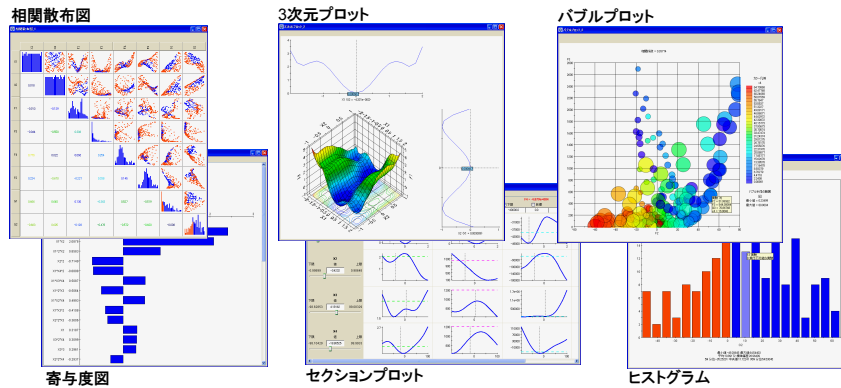
- ✓ 解析作業を自動化するメリット



CYBERNET ⑥OPTIMUSによるANSYS/CODE Vの統合環境構築

➤ 結果データの可視化

- ✓ 繰り返し計算により蓄積した結果データを可視化し、問題分析を行うことができます。
- ✓ ポストプロットの一例(全28種)



※ポストプロット画面はANSYS-CODE V事例のデータとは異なります。

© 2009 CYBERNET SYSTEMS CO.,LTD. All Rights Reserved.

23

CYBERNET ⑥OPTIMUSによるANSYS/CODE Vの統合環境構築

➤ 計算効率の高い最適化の実現

- ✓ 一般的にANSYS FLUENTなどの流体解析は、1回の計算時間が数時間におよぶことがあり、繰り返し計算が必要な最適化には多くの時間を要します。
- ✓ この問題に対しOPTIMUSは以下のソリューションを提供します。
 - ◆ **実験計画法・応答曲面法による問題分析：**
予め実験計画法や応答曲面法を利用することで、設計変数のスクリーニングを行うことや、最適解の見当をつけることができます。これにより最適化を行う際、効率的な最適化アプローチを選択することができます。
 - ◆ **計算効率の高い最適化アルゴリズム：**
ANSYS FLUENTの解析を予め作成した応答曲面モデルにより代用することで、計算時間を大幅に削減することができます。また、最適化計算過程で自動的に応答曲面モデルを作成し、逐次更新する最適化アルゴリズムを利用することで、計算効率と計算精度の両立を実現します。
 - ◆ **分散処理機能：**
繰り返し計算を複数のPCで分散処理することにより、空いているPCやライセンスを有効活用し、計算効率を向上させることができます。

© 2009 CYBERNET SYSTEMS CO.,LTD. All Rights Reserved.

24

CYBERNET まとめ

- ANSYS製品(ANSYS Design Modeler/ANSYS FLUENT/ANSYS Mechanical)、CODE V、OPTIMUSを用いた熱ひずみを考慮した光学設計手法を確立しました。
 - ✓ ANSYS Workbench上でANSYS DesignModeler/ANSYS FLUENT/ANSYS Mechanicalの連成解析を実施することで、熱流体の影響を加味した光学エレメントの配置ずれの予測を行ないました。
 - ✓ 以下のマクロを作成し、ANSYS-CODE V-OPTIMUSの連携を可能にしました。
 - ・ANSYS Mechanical から熱変形後の光学エレメント配置を出力するマクロ
 - ・熱変形後の光学エレメント配置情報をCODE V入力フォーマットに変換するマクロ
 - ✓ 熱変形前後の配置構成を他のズームポジションにとり、面形状について両構成を同時に最適化することで、熱変形に対してロバスト性の高い系への再設計を行いました。
 - ✓ 最適設計支援ツールOPTIMUSを用いることで、すべての解析工程の自動化を可能にしました(今後最適化機能を用いた検証も行う予定です)。

CYBERNET 【補足: マクロの概要】ANSYSが出力するテキストファイルの内容

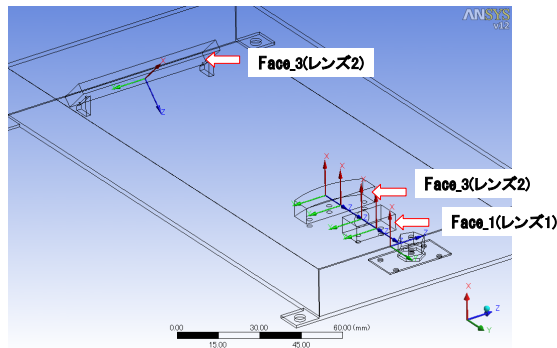
変形後の重心位置(x,y,z)

0' X' ベクトル(x,y,z)

0' Y' ベクトル(x,y,z)

-0.1171464878E-02	-0.1474271183E-01	0.4001785844E-02	0.9999814088E+00	-0.8731208603E-02	0.8754519192E-03	0.8754828297E-03	0.8133512865E-05	-0.8689885242E+00
-0.8032888278E-03	-0.3738782219E-01	0.4007171303E-02	0.8984558408E+00	0.3284232880E-01	0.1785818872E-02	0.1802107586E-02	-0.1572712851E-03	-0.8989883838E+00
0.2803158550E-04	-0.1832213788E+00	0.3889813055E-02	0.7100818902E+00	0.7041183005E+00	0.8188188108E-04	-0.3181451811E-05	0.8878802880E-04	-0.8689888882E+00

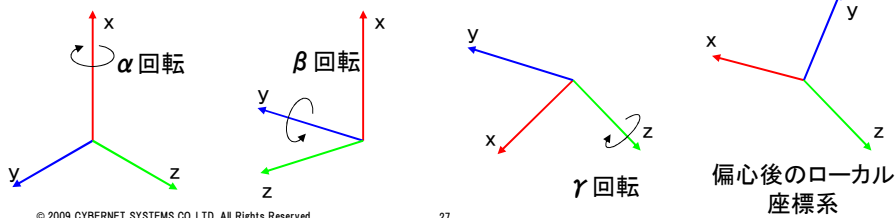
1段目: Face_1(レンズ1)
2段目: Face_3(レンズ2)
3段目: Face_5(鏡)



CYBERNET 【補足:マクロの概要】ANSYS ⇒ CODE V データ変換処理

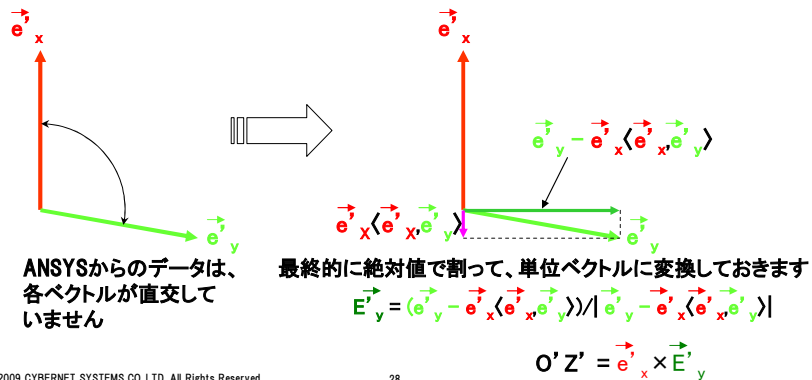
- ・ 平行偏心成分については、単位変換処理のみ
- ・ ティルト偏心成分については、オイラー角(X-Y-Z)で求める必要があります
 - ・ ANSYSからのデータは、変形後の各面のローカル座標のX,Y,Z各単位ベクトルのグローバル座標系基準成分です
 - ・ ANSYSから渡される熱変形後のローカル座標ベクトルの各成分と、 $\alpha \beta \gamma$ 回転行列の各成分とからオイラー角を算出します
 - ・ $O'Z'$ を計算するために、 $O'X'$ 、 $O'Y'$ が直交するように調整処理が必要です。直交処理後を行ったベクトル成分データを用いて、外積より $O'Z'$ の各軸の単位ベクトルを計算します

CODE Vのティルト偏心データの処理(α 、 β 、 γ の順でティルトが加えられます)



CYBERNET 【補足:マクロの概要】単位ベクトル $O'X'$ 、 $O'Y'$ の直交処理

- ANSYSからの単位ベクトルデータは、それぞれ直交していない
 - ✓ $O'Z'$ ベクトルを求めるために、まず始めに2ベクトルを直交するように調整処理を行う必要があります
 - ✓ 直交処理後の各単位ベクトル(\vec{e}'_x, \vec{E}'_y)を用いて、外積より $O'Z'$ ベクトル成分を求めます



CYBERNET 【補足:マクロの概要】CODE V ティルト偏心角の算出

- 前述の計算処理により求めた、熱変形後の各面のローカル座標の単位ベクトル成分と、下記回転行列との関係より、ティルト偏心角 α, β, γ を計算する

α, β, γ 回転させる行列 $M_{\alpha\beta\gamma}$

$$M_{\alpha\beta\gamma} = \begin{pmatrix} \cos \beta \cos \gamma & -\cos \beta \sin \gamma & -\sin \beta \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma & -\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \cos \beta \\ \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma - \sin \alpha \sin \gamma & -\cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix}$$

単位ベクトル $\vec{e}_x = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{e}_y = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{e}_z = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ は α, β, γ 回転後、

$$\vec{e}'_x = \begin{pmatrix} e'_{x1} \\ e'_{x2} \\ e'_{x3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta \cos \gamma \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma \\ \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma - \sin \alpha \sin \gamma \end{pmatrix}, \vec{e}'_y = \begin{pmatrix} e'_{y1} \\ e'_{y2} \\ e'_{y3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos \beta \sin \gamma \\ -\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma \\ -\cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma \end{pmatrix}, \vec{e}'_z = \begin{pmatrix} e'_{z1} \\ e'_{z2} \\ e'_{z3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \beta \\ \sin \alpha \cos \beta \\ \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix}$$

に変換される。

よって、ANSYSからの単位ベクトルデータを基にして、オイラー角を求める。

1. $e'_{z1} = -\sin \beta$ より、 β を求める
2. $e'_{x1} = \cos \beta \cos \gamma$ または $e'_{y1} = -\cos \beta \sin \gamma$ より、 γ を求める
3. $e'_{z3} = \sin \alpha \cos \beta$ より、 α を求める