[49]遊星歯車機構の起振力解析システム

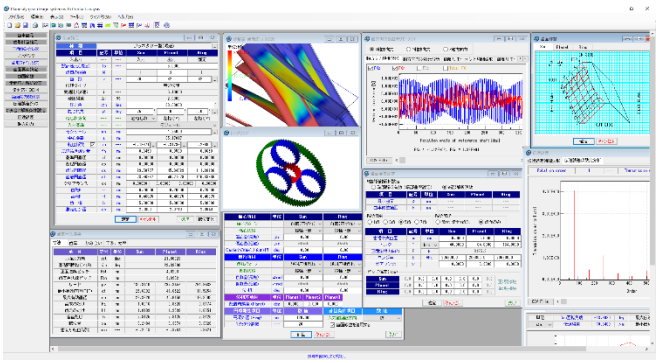


図 49.1　遊星歯車機構の起振力解析システム

49. 1 概要

遊星歯車機構の起振力は，歯数の組み合わせや位相の影響を受けるため，間違った歯数の組み合わせとした場合には，高精度な歯車や高精度な組み立てとしても遊星歯車機構の起振力を抑えることはできません. また, それらに加えて歯形偏差や歯すじ偏差, そして負荷が作用したときの端部接触による影響も起振力に影響を及ぼしますので起振力は増加することになります．また，位相を最適とした組み合わせとした場合でも歯車精度や端部接触による影響を受けることになります．そして，コストなど種々考慮して設計した歯車機構がどれほど安定した遊星歯車機構であるかを知るためには起振力（値，変化）を知ることが重要となります．

汎用 CAE ソフトウェアで遊星歯車装置の振動解析をする場合には，歯車やキャリアの起振力を基に解析する必要があります．

これらの問題を解決するために，**遊星歯車機構の起振力解析システム** では，位相や歯面偏差，そして歯の接触問題を考慮して遊星歯車機構の起振力を解析することができますのでこの起振力を使用することが有効な評価する手段と言えます. 図 49.1 に遊星歯車機構の起振力解析システムの全体画面を示します.

49. 2 適用

(1) 型 式　：プラネタリー，ソーラ，スター
(2) 位相　：同位相，等分位相，カウンター位相，不等配置
(3) 歯形　：インボリュート歯形

49. 3 プロパティ（基準ラック）

プロパティで，歯先円直径の決定方式，基準ラック，モジュールまたは中心距離基準, 歯車精度, 平均摩擦係数の設定をします. 図 49.2 にプロパティの画面を示します.

図 49.2　プロパティ

49. 4 遊星歯車機構の選択

図49.3に示す遊星歯車タイプの選択をします(プラネタリー型, ソーラ型，スター型の増減速)． 次に，図 49.4 で遊星歯車諸元を設定します.

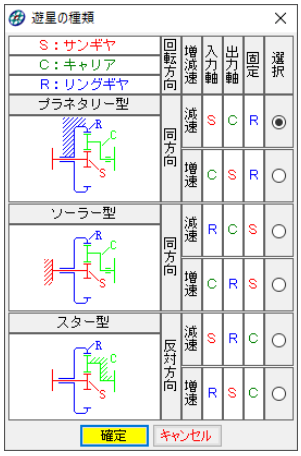


図 49.3　遊星歯車のタイプ

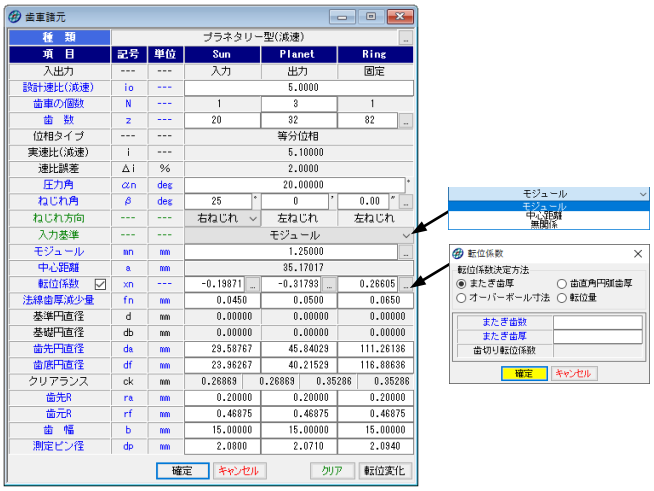


図 49.4　歯車諸元

図 49.5　歯数選択

(1) 遊星歯車の個数は，1～6 です.
(2) 歯数は，直接入力する方式と，速比から計算した歯数一覧（図 49.5）から選択する方式があります．図 49.5 では，等分位相で速比誤差を 10%として計算した例を示しています.
(3) 中心距離基準，モジュール基準，そして中心距離，モジュールを無関係に設定することができます.

(4) 転位係数の計算は，モジュールと中心距離からバックラッシが 0 になるように計算します．

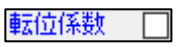
(5) 法線歯厚減少量の入力値は，デフォルト値として JIS バックラッシ標準中間値の 1/2 を表示します．

(6) 歯先円直径はプロパティで設定した基準ラックの歯たけと転位係数から標準値を計算しますが変更は可能です．

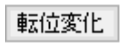
(7) 外歯車の歯元部の形状は，基準ラックによる創成運動によって生成する歯形です．内歯車の歯元は，入力 R 接続です．

(8) 歯車の歯先は R で作成することができます．

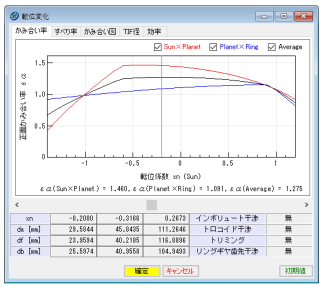
(9) 転位係数は，1 種を変更すると残りの転位係数が連動して変化しますが，

を 

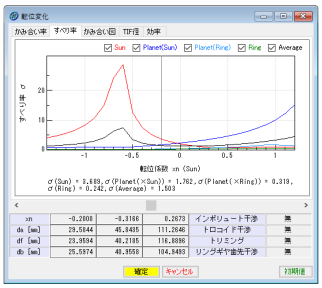
のように を外すことで歯車それぞれ任意に転位係数を入力することができます．

(10) 歯車諸元画面（図 49.4）右下にある 

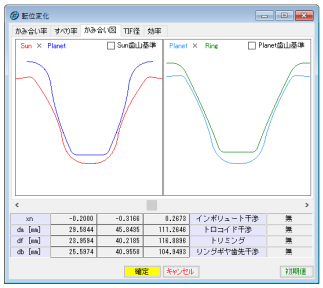
では転位の変化に伴う「かみ合い率」，「すべり率」，「歯形」，「TIF 径」，そして「効率」を図 49.6 のように表示します．例えば，効率を基準として転位係数を決定する場合は，図 49.6 (e)の効率グラフを指針として転位係数を決定することができます．そして，図 49.6 (e) の画面のスライドバーを移動し，適正値を確定することにより転位係数を図49.4 の歯車諸元に移行することができます．



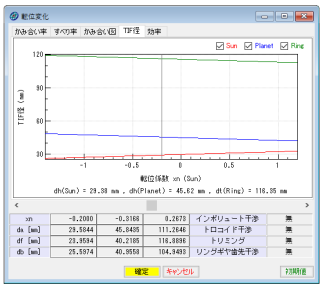
(a) かみ合い率



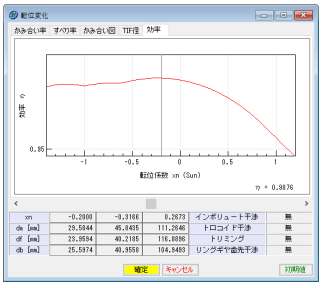
(b) すべり率



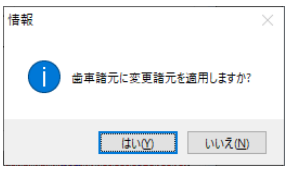
(c) 歯形



(d) TIF 径



(e) 効率

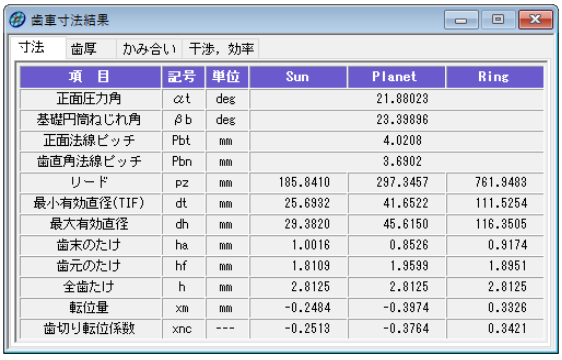


(f) 数値の適用

図 49.6　転位変化に伴う各値

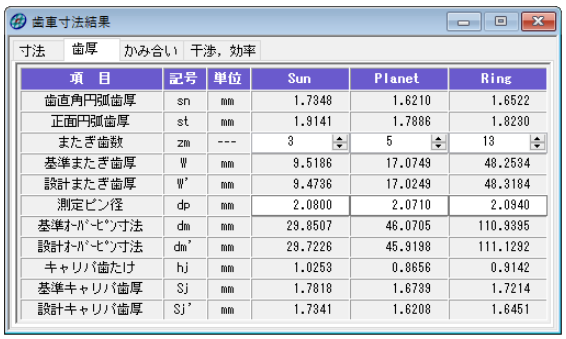
49.5 歯車寸法

歯車諸元（図 49.4）確定後，各種計算結果を図 49.7～49.10 に示します．この画面で，寸法，歯厚，干渉の有無，効率，バックラッシなどの確認をすることができます．



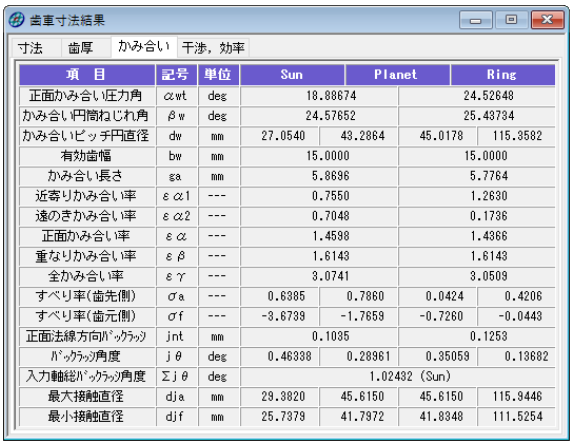
項　目	記号	単位	Sun	Planet	Ring
正面圧力角	αt	deg		21.88023	
基礎円筒ねじれ角	βb	deg		23.39896	
正面法線ピッチ	Pbt	mm		4.0208	
歯直角法線ピッチ	Pbn	mm		3.6902	
リード	pz	mm	185.8410	297.3457	761.9483
最小有効直径(TIF)	dt	mm	25.6932	41.6522	111.5254
最大有効直径	dh	mm	29.3820	45.6150	116.3505
歯末のたけ	ha	mm	1.0016	0.8526	0.9174
歯元のたけ	hf	mm	1.8109	1.9599	1.8951
全歯たけ	h	mm	2.8125	2.8125	2.8125
転位量	xm	mm	-0.2484	-0.3974	0.3326
歯切り転位係数	xnc	---	-0.2513	-0.3764	0.3421

図 49.7　寸法



項　目	記号	単位	Sun	Planet	Ring
歯直角円弧歯厚	sn	mm	1.7348	1.8210	1.6522
正面円弧歯厚	st	mm	1.9141	1.7886	1.8230
またぎ歯数	zm	---	3	5	13
基準またぎ歯厚	W	mm	9.5186	17.0749	48.2534
設計またぎ歯厚	W'	mm	9.4736	17.0249	48.3184
測定ピン径	dp	mm	2.0800	2.0710	2.0940
基準ｵｰﾊﾞｰﾋﾟﾝ寸法	dm	mm	29.8507	46.0705	110.9395
設計ｵｰﾊﾞｰﾋﾟﾝ寸法	dm'	mm	29.7226	45.9198	111.1292
キャリパ歯たけ	hj	mm	1.0253	0.8656	0.9142
基準キャリパ歯厚	Sj	mm	1.7818	1.6739	1.7214
設計キャリパ歯厚	Sj'	mm	1.7341	1.6208	1.6451

図 49.8　歯厚



項　目	記号	単位	Sun	Planet	Ring	
正面かみ合い圧力角	αwt	deg	18.88674		24.52648	
かみ合い円筒ねじれ角	βw	deg	24.57652		25.43734	
かみ合いピッチ円直径	dw	mm	27.0540	43.2864	45.0178	115.3582
有効歯幅	bw	mm	15.0000		15.0000	
かみ合い長さ	ga	mm	5.8696		5.7764	
近寄りかみ合い率	εα1	---	0.7550		1.2630	
遠のきかみ合い率	εα2	---	0.7048		0.1736	
正面かみ合い率	εα	---	1.4598		1.4366	
重なりかみ合い率	εβ	---	1.6143		1.6143	
全かみ合い率	εγ	---	3.0741		3.0509	
すべり率(歯先側)	σa	---	0.6385	0.7860	0.0424	0.4206
すべり率(歯元側)	σf	---	-3.6739	-1.7659	-0.7260	-0.0443
正面法線方向ﾊﾞｯｸﾗｯｼ	jnt	mm	0.1035		0.1253	
ﾊﾞｯｸﾗｯｼ角度	jθ	deg	0.46338	0.28961	0.35059	0.13682
入力軸総ﾊﾞｯｸﾗｯｼ角度	Σjθ	deg	1.02432 (Sun)			
最大接触直径	dja	mm	29.3820	45.6150	45.6150	115.9448
最小接触直径	djf	mm	25.7379	41.7972	41.8348	111.5254

図 49.9　寸法（かみ合い）

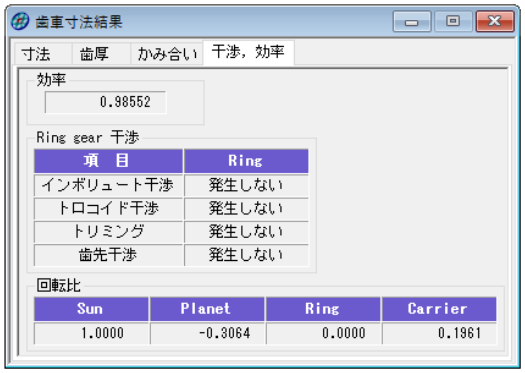


図 49.10　効率，干渉

49.6 かみ合い図

歯車のかみ合いを図49.11および図49.12のように2次元図で表示します．操作画面によって，補助円や共通法線を表示することができますので歯面の接触位置の確認が容易です．歯車の回転角度を変え，拡大表示することができます．

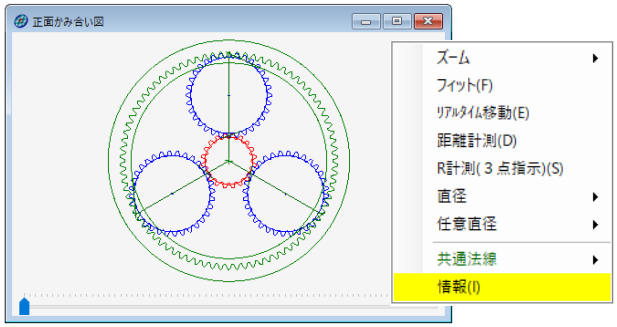
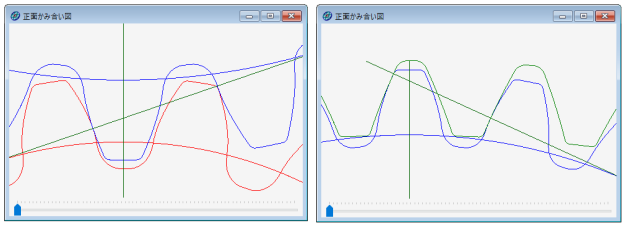


図 49.11　かみ合い図



(a) 太陽×遊星　　(b) 遊星×内歯車

図 49.12　かみ合い図拡大

49.7 レンダリング

歯車3Dのかみ合いを図49.13のように表示することができX, Y, Z方向に回転させることができます．

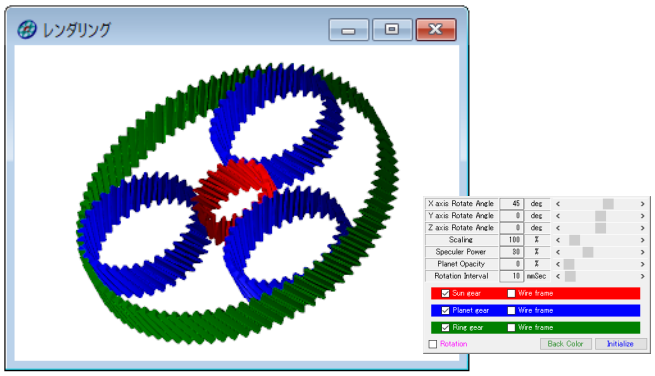


図 49.13　歯形レンダリング

49.8 歯形データファイル出力

生成した3種類歯車の歯形はファイル出力することができます．図49.14にCAD作図例を示します．

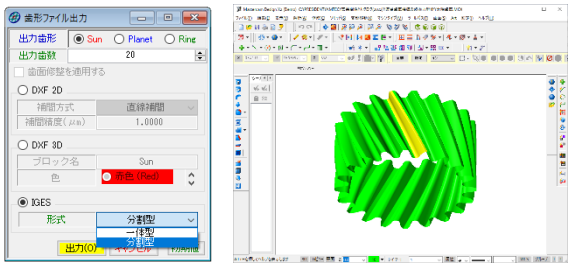


図 49.14　歯形データ出力と CAD 作図例

49.9 歯面修整

歯面修整は，太陽歯車，遊星歯車，内歯車それぞれに施すことができます．修整の種類は，歯形修整，歯すじ修整，歯面修整の3種類ですが，実測した歯面データ（図49.18）を読み込む機能があり，図49.19で図49.15にデータを移行します．

本例では，図49.15～49.17のように遊星歯車に歯すじ修整のみ与えた例を示します．

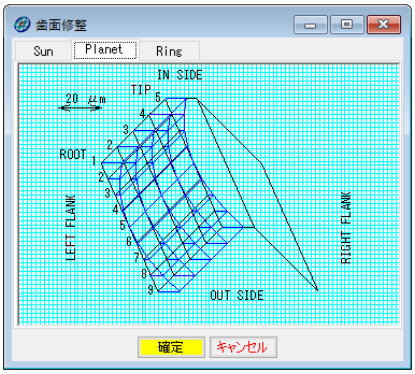


図 49.15　歯すじ修整の例（遊星歯車）

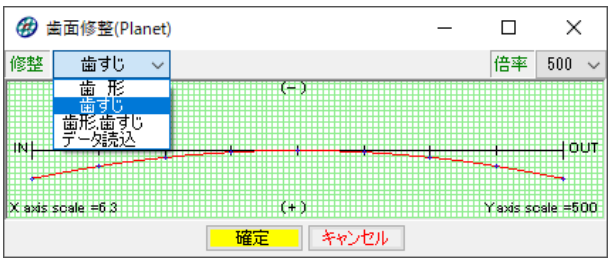


図 49.16　歯すじ修整の設定 1

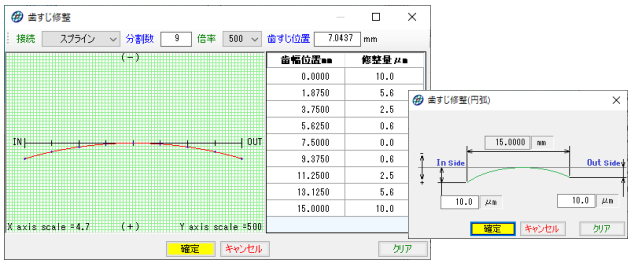


図 49.17　歯すじ修整の設定 2

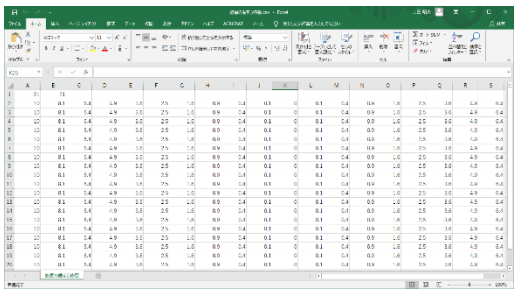


図 49.18　歯面修整データの例（csv）

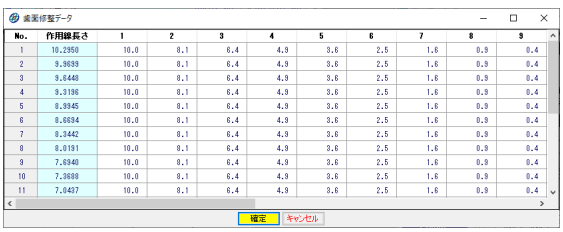


図 49.19　歯面修整実測データの読み込み

49.10　歯面応力解析設定

歯面応力解析は，CT-FEM Operaiii（ソフトウェア[45]参照）の歯面膜要素を用いた解析機能を採用していますので図 49.20 のように，まず，端部解析の有効，無効を設定します．端部解析は，トロコイド干渉などの端部を解析する場合に使用します．次に，歯幅中央位置，トルク，ヤング率，ポアソン比，ピッチ偏差を設定し，図 49.21 で，かみ合い範囲角度と，食い違い誤差および並行度誤差を設定します．歯面応力解析結果を図 49.22～49.25 に示します．

図 49.20　歯面応力解析設定

図 49.21　歯面応力解析条件設定

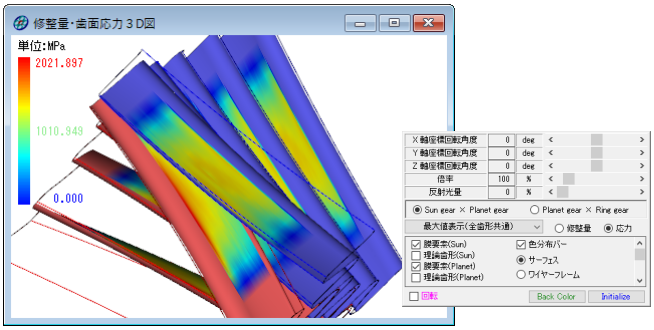


図 49.22　歯面応力（太陽歯車×遊星歯車）

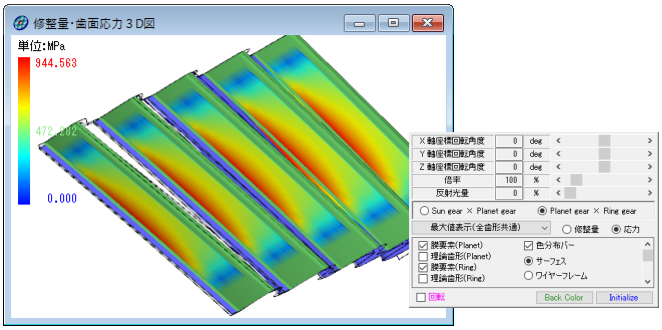


図 49.23　歯面応力（遊星歯車×内歯車）

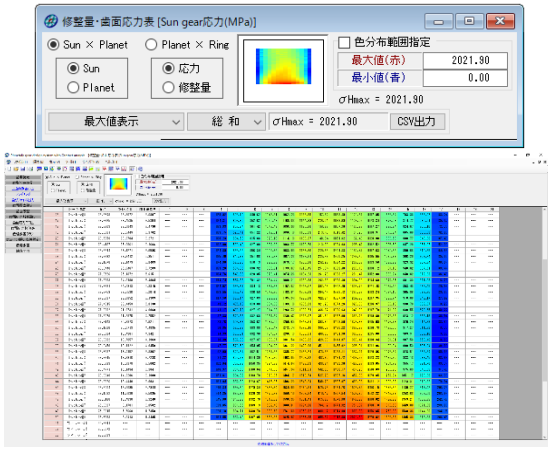


図 49.24　太陽の歯面応力（太陽歯車×遊星歯車）

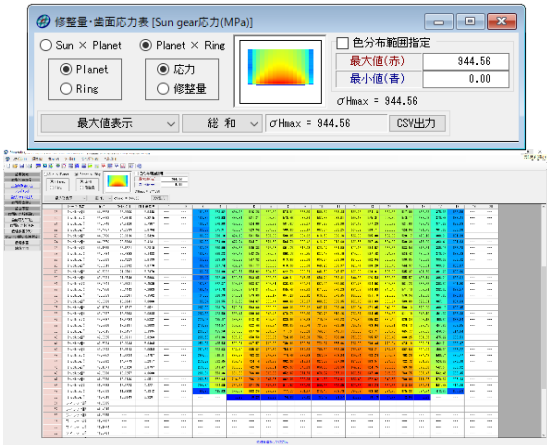
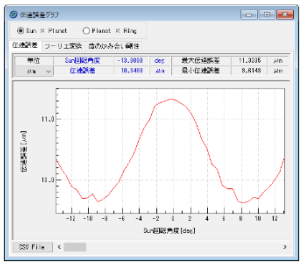


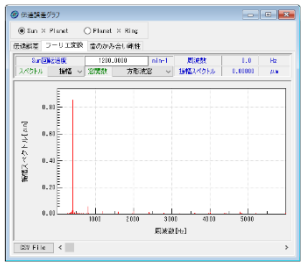
図 49.25　遊星の歯面応力（遊星歯車×内歯車）

49.11　伝達誤差解析結果

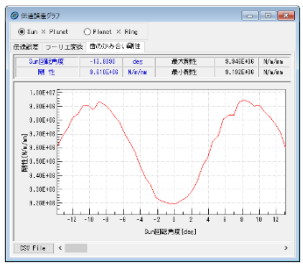
伝達誤差解析結果を図 49.26 に示します．



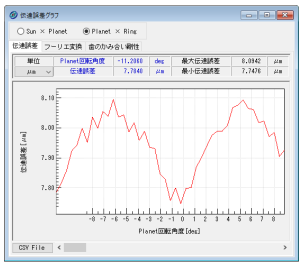
(a) sun × planet, *TE*=1.72μm



(b) sun × planet, FFT



(c) sun × planet, 剛性



(d) planet × ring. TE=0.35μm

図 49.26　伝達誤差解析結果

49.12　遊星歯車機構のかみ合い解析

かみ合い解析条件を図 49.27 のように設定します．ここでは，軸の偏心量，軸の倒れ量，位相，位置角度誤差，入力軸の回転方

向, そして, ここでは解析時の 1 ピッチ分割数を設定しています. また, 遊星歯車構の座標系を図 49.31 に示します.

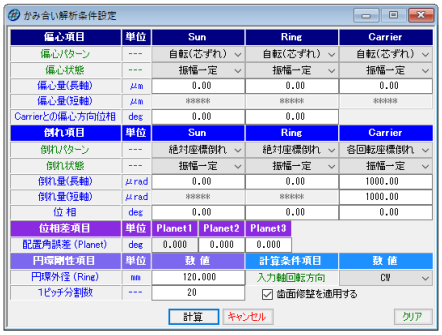
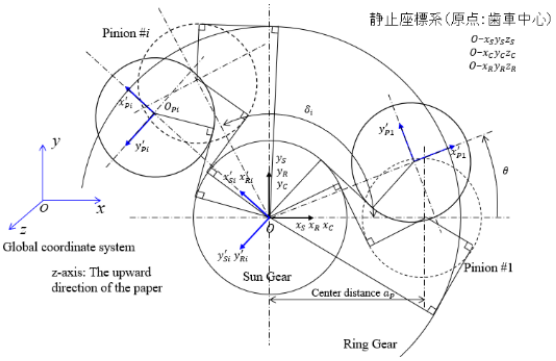
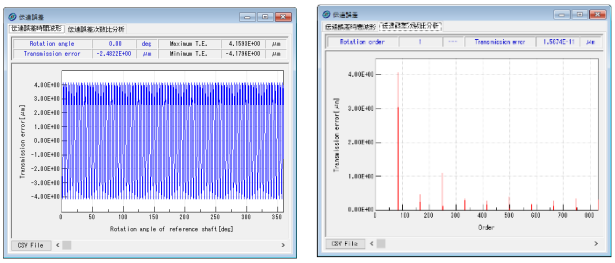


図 49.27　かみ合い解析条件設定



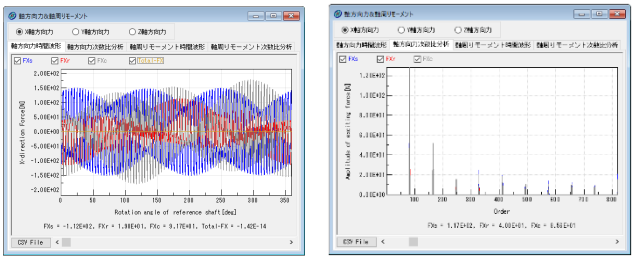
(z 軸方向が歯車軸方向に対応)

図 49.28　遊星歯車機構の座標系 [1)]

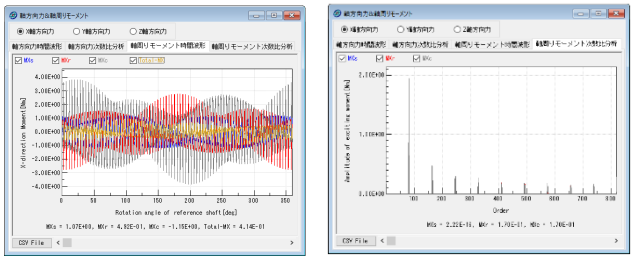


(a) 伝達誤差時間波形　　(b)次数比分析

図 49.29　遊星歯車機構の伝達誤差



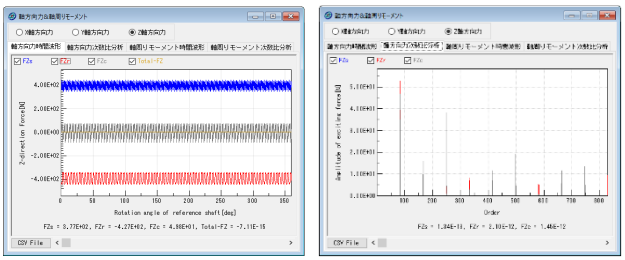
(a) X 軸方向の力の時間波形　　(b) 次数比分析



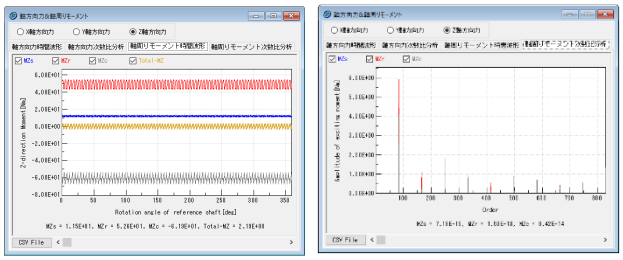
(c) X 軸周りモーメント時間波形　　(d) 次数比分析

図 49.30　各要素に作用する X 軸方向の力とモーメント

解析結果は, 遊星歯車機構の伝達誤差および サンギヤ s, キャリア c, リングギヤ r に作用する X, Y, Z 軸方向の力と各軸回りのモーメントを図 49.29 ～49.31 のように時間波形と次数比分析のスペクトルで表示します（Y 軸方向力の表示は省略）.



(a) Z 軸方向の力の時間波形　　(b) 次数比分析



(c) Z 軸周りモーメントの時間波形　　(d) 次数比分析

図 49.31　各要素に作用する Z 軸方向の力とモーメント

これらの解析値（時間波形および次数比分析）は, 図 49.32 のように csv ファイルとして出力することができます.

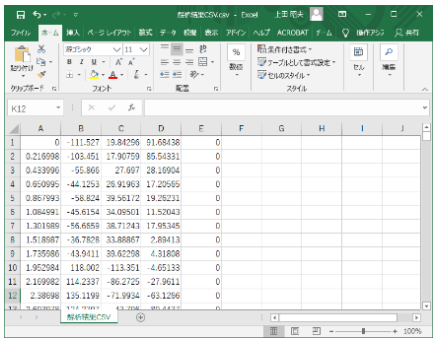


図 49.32　解析結果のデータ出力例

49. 13 HELP 機能

操作方法を知りたい場合は, 図 49.33 の[HELP]機能を使用することができます.

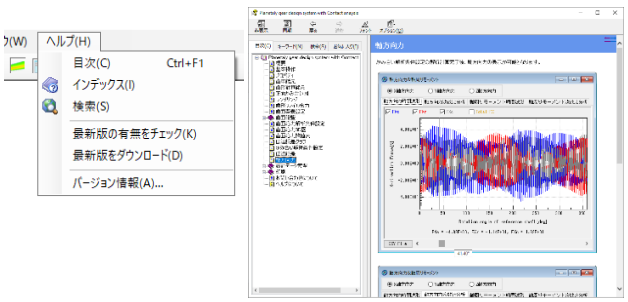


図 49.33　HELP 機能

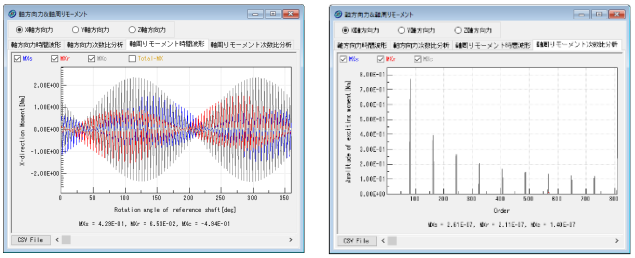
49.14　遊星歯車機構の起振力解析例

遊星歯車機構の歯数の組み合わせの違いによる起振力解析例を図 49.34～49.40 に示します．解析例 1 のかみ合い位相は，同位相であり解析例 2 は，等分位相です．なお，かみ合い解析条件設定は，図 49.27 と同じとしています．

(1) 解析例 1

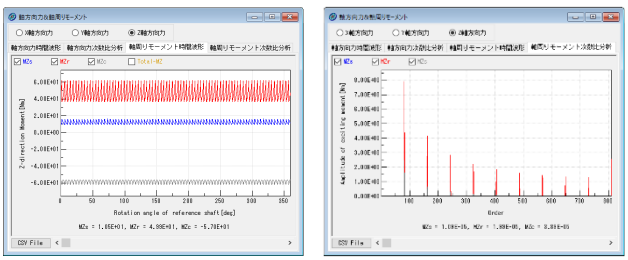
図 49.34　歯車諸元（解析例 1）

図 49.35　歯面応力解析設定（解析例 1, 2 共通）



(a) X 軸周りモーメント時間波形　　(b) 次数比分析

図 49.36　各要素に作用する X 軸方向の力とモーメント

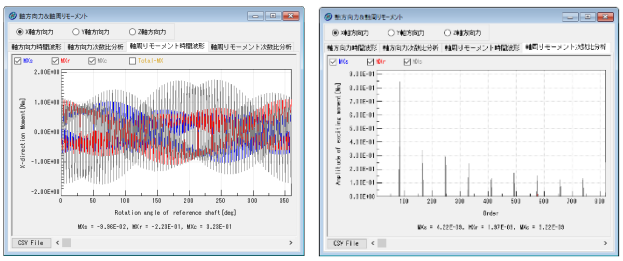


(a) Z 軸周りモーメント時間波形　　(b) 次数比分析

図 49.37　各要素に作用する Z 軸方向の力とモーメント

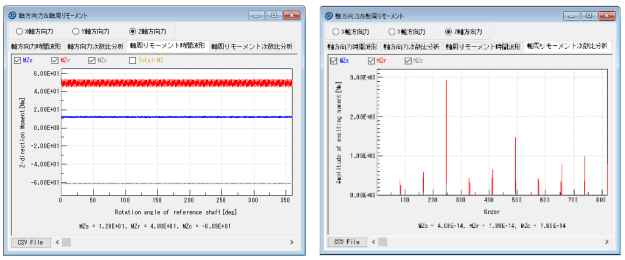
(2) 解析例 2

図 49.38　歯車諸元（解析例 2）



(a) X 軸周りモーメント時間波形　　(b) 次数比分析

図 49.39　各要素に作用する X 軸方向の力とモーメント



(a) Z 軸周りモーメント時間波形　　(b) 次数比分析

図 49.40　各要素に作用する Z 軸方向の力とモーメント

X 軸周りのモーメント（倒れ方向起振力）は，図 49.36 と図 49.39 の比較から等分位相の方が大きくなっています．一方，Z 軸周りのモーメント（回転方向起振力）は，図 49.37 と図 49.40 の比較から同位相の方が大きくなっています．また，同位相の遊星歯車では，図 49.36 と図 49.37 の比較から，どちらもかみ合い次数 z=81 次とその高調成分でピークとなります．等分位相の遊星歯車では，図 49.39 と図 49.40 の比較から，Z 軸回りのモーメントはかみ合い次数 z=82 とその高調成分でピークを示しますが，X 軸周りのモーメントでは，z=83 でピークを示しています．すなわち，この解析ソフトウェアは，遊星歯車特有のサイドバンド現象も解析することができます．ここでは，各軸回りのモーメントしか示していませんが，各軸方向の力に付いても同様の結果は得られます．

参考文献

1) 森川他，遊星歯車のサイドバンド現象，機論，Vol.80, No.815 (2014)