

[54] ステップドピニオン式遊星歯車システム

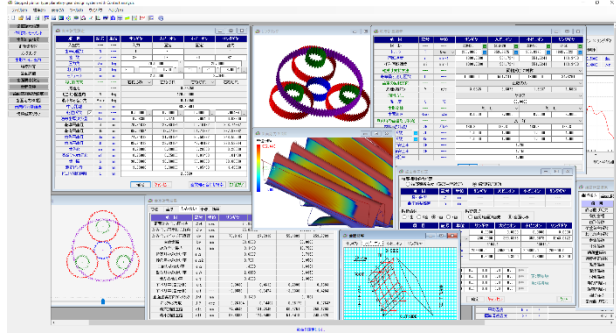


図 54.1 ステップドピニオン式遊星歯車

54.1 概要

ステップドピニオン式遊星歯車は、プラネナリ型遊星機構に対し、ピニオン（星歯車）が2段となっていて1つ目のピニオンは太陽歯車と2つ目のピニオンは内歯車とかみ合います。そのためピニオンの歯数の違いからプラネナリ型（遊星歯車1個）より大きな減速比を得ることができます。図54.1に計算結果の全体画面を示します。本遊星歯車の仕様を(1)～(8)に示します。

- (1) 遊星歯車（ピニオン）の個数は、2～9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 54.4）から選択する方式があります。
- (3) 中心距離の変更をすることができます。
- (4) バックラッシは、法線歯厚減少量で設定します。標準値は、JIS バックラッシ標準中間値の 1/2 を表示します。
- (5) 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、任意に変更は可能です。
- (6) 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します。内歯車の歯元は R 接続です。
- (7) 歯車の歯先面取りは R で作成することができます。
- (8) 転位係数は 1 種を変更すると他の歯車転位係数が連動して変化しますが、歯車それぞれ個別に入力することも可能です。

54.2 プロパティ（基準ラック）

図 54.2 のようにプロパティで基準ラック、歯先円直径の決定方式、摩擦係数および歯車精度を設定します。

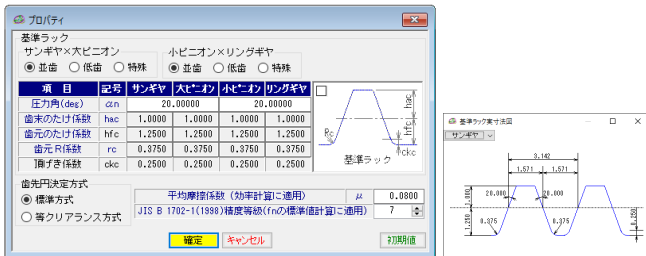


図 54.2 プロパティ（基準ラック）

54.3 歯車諸元（歯数の組み合わせと寸法）

歯車諸元入力画面を図 54.3 に示します。ステップドピニオン式遊星歯車では組み立て性を考慮して星歯車の歯数比を整数とする方法が採用されます。本ソフトウェアでは、図 54.3 右下の「歯数組み合わせ検索」機能により図 54.4 のように歯数表を表示します。

項目	記号	単位	サンギヤ	大ピニオン	小ピニオン	リングギヤ
入出力	---	---	入力	固定	固定	出力
歯車の歯数	N	---	1	3	---	1
歯 数	z	---	92	58	20	92
圧力角	α_n	deg	20.0000	---	20.0000	---
ねじれ角	β	deg	25	0	0.00	11
モジュール	m	mm	2.0000	---	2.7040	---
ねじれ方向	---	---	右ねじれ	左ねじれ	右ねじれ	右ねじれ
減速比	i	---	9.9375	---	---	---
ピニオン配置角	ϕ	deg	120.0000	---	---	---
中心距離	a	mm	99.3040	---	---	---
転位係数	x	---	0.0000	0.0000	0.0000	0.00484
法線歯厚減少量	fn	---	0.06300	0.07400	0.06400	0.09200
基準円直径	d	mm	70.61619	127.39194	55.16162	259.74347
基準円間径	db	mm	65.52994	118.77193	51.71292	237.87942
歯先円直径	da	mm	74.61619	131.99194	60.56962	248.50000
歯面円直径	df	mm	65.61619	122.99194	48.40162	238.52964
歯先R	ra	mm	0.20000	0.20000	0.20000	0.20000
基準ラック歯元R	rf	mm	0.75000	0.75000	1.01400	1.01400
歯 幅	b	mm	30.00000	30.00000	30.00000	30.00000
測定ピッチ	dp	mm	3.99000	3.98800	4.65400	4.49500
ピニオン間の距離	L	mm	---	---	2.3520	---

図 54.3 歯車諸元

歯数の組み合わせは、図 54.4 で遊星歯車（ピニオン）個数、減速比範囲、歯数範囲を設定することで歯数一覧を表示します。また、不等配置とする場合は、図 54.4 に示す[☐ピニオン不等配置を含める]で対応可能です。本例では、歯数の組み合わせの中から No.1 を選択した例を示します。また、転位係数は、転位係数の入力の他に歯厚（またぎ、OBD）からも設定可能です。そして、図 54.3 の[確定]を押すと、図 54.5～54.8 のように寸法、歯厚、そして干渉、効率、相マークの計算結果を表示します。

項目	値
ピニオン歯数	3
減速比範囲	7.000 ~ 10.000
サンギヤ歯数範囲	92 ~ 93
大ピニオン歯数範囲	58 ~ 60
小ピニオン歯数範囲	20 ~ 21
リングギヤ歯数範囲	92 ~ 94
基準効率 η_1	0.99000
基準効率 η_2	0.99000
組み合わせ最大歯数	90

☐ ピニオン不等配置を含める

No.	サンギヤ歯数	大ピニオン歯数	小ピニオン歯数	サンギヤ歯数	ギヤ比	効率(%)
1	92	58	20	92	9.9375	99.2331
2	92	58	21	93	9.9268	99.2305
3	92	59	20	94	9.6556	99.2159
4	92	59	21	93	9.1652	99.2271
5	92	60	21	92	9.2143	99.2260

図 54.4 歯数組み合わせ表

項目	記号	単位	サンギヤ	大ピニオン	小ピニオン	リングギヤ
正面圧力角	α_t	deg	21.88029	---	---	20.36743
基準円間ねじれ角	β_b	deg	23.39896	---	---	10.67130
正面法線ピッチ	Pbt	mm	6.4933	---	---	8.1230
歯面法線ピッチ	Pbn	mm	5.3043	---	---	7.9826
リード	pz	mm	475.7531	862.3024	862.1670	3965.9683
最小有効直径(TIF)	dt	mm	67.3486	124.3809	51.8387	248.7826
最大有効直径	dh	mm	74.4048	131.7645	60.3751	259.3021
歯元のたけ	ha	mm	2.0000	2.0000	2.7040	2.6217
歯元のたけ	hf	mm	2.5000	2.5000	3.3800	3.3931
全歯たけ	h	mm	4.5000	4.5000	6.0840	6.0148
転位量	xm	mm	0.0000	0.0000	0.0000	0.0131
歯切り転位係数	xnc	---	-0.0460	-0.0541	-0.0346	0.0546

図 54.5 寸法

項目	記号	単位	サンギヤ	大ピニオン	小ピニオン	リングギヤ
歯面円弧歯厚	sn	mm	3.0745	3.0628	4.1793	4.1400
歯面円弧歯厚	st	mm	3.3924	3.3795	4.2629	4.2228
またぎ歯数	z	---	5	9	3	11
基準またぎ歯厚	W	mm	27.7548	52.3952	20.7579	87.5126
設計またぎ歯厚	W'	mm	27.6910	52.2612	20.6993	87.6046
測定ピッチ	dp	mm	3.980	3.968	4.654	4.495
基準オガベリ寸法	dn	mm	75.2245	132.5428	61.5697	247.7700
設計オガベリ寸法	dn'	mm	75.0559	132.3368	61.4127	248.0500
キヤリバ歯たけ	hj	mm	2.0287	2.0158	2.7926	2.6105
基準キヤリバ歯厚	Sj	mm	3.1409	3.1414	4.2436	4.2377
設計キヤリバ歯厚	Sj'	mm	3.0739	3.0627	4.1757	4.1379

図 54.6 歯厚

ことができます。また、トルク単位は「 $\text{kN}\cdot\text{m}$ 」, 「 $\text{N}\cdot\text{m}$ 」, 「 $\text{N}\cdot\text{cm}$ 」, 「 $\text{N}\cdot\text{mm}$ 」から選択することができ、トルク、回転速度は入力側、出力側のどちらでも入力可能です。強度計算結果を図 54.18 および図 54.19 に示します。強度計算は効率やかみ合い率を考慮し、金属歯車は JGMA401-01:1974, JGMA401-02:1975 に基づき強度計算を、樹脂材料の応力値は、温度、寿命などを考慮した材料の実験値を採用しています。

図 54.15 強度諸元入力

図 54.16 材料設定

図 54.17 材料選択

項目	記号	単位	サンギヤ	大ピニオン	小ピニオン	リングギヤ
許容曲げ応力	σ_{Flim}	MPa	470,500	480,500	480,500	461,000
有効歯幅	b'	mm	30,000	30,000	30,000	30,000
歯形係数	YF	---	2.4513	2.3868	2.8209	2.2287
荷重分布係数	Y ϵ	---	0.7038	0.7038	0.5806	0.5806
ねじれ角係数	Y β	---	0.7817	0.7817	0.9053	0.9053
寿命係数	KL	---	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
寸法係数	KFx	---	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
動荷重係数	Kv	---	1.2349	1.2349	1.0594	1.0594
速度補正係数	KVo	---	*****	*****	*****	*****
温度係数	KT	---	*****	*****	*****	*****
滑潤係数	KLo	---	*****	*****	*****	*****
材質係数	KM	---	*****	*****	*****	*****
平均円周力	Ft	N	1898,1419	1874,5857	4349,0389	4316,3164
許容円周力	Ftlim	N	13947,1392	15141,5626	20327,8538	24885,3216
曲げ強さ	Sf	---	7,3867	8,0773	4,6741	5,7191
歯面曲げ応力	σ_F	MPa	63,8953	59,4878	102,8005	80,6075

図 54.18 強度計算結果 (曲げ)

項目	記号	単位	サンギヤ	大ピニオン	小ピニオン	リングギヤ
許容ヘルツ応力	σ_{Hlim}	MPa	1284,5000	1275,0000	1275,0000	1314,0000
有効歯幅	b	mm	30,000	30,000	30,000	30,000
歯形係数	ZH	---	2.3868	2.3868	2.4530	2.4530
材料定数係数	ZM	MPa	189,8000	189,8000	189,8000	189,8000
かみ合い係数	Ze	---	0.8390	0.8390	0.8456	0.8456
寿命係数	KL	---	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
粗さ係数	ZR	---	0.9481	0.9481	0.9481	0.9481
滑潤係数	ZV	---	0.8786	0.8786	0.8786	0.8786
硬さ係数	ZW	---	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
荷重分布係数	Y ϵ	---	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
動荷重係数	Kv	---	1.2349	1.2349	1.0594	1.0594
弾性係数	E	MPa	*****	*****	*****	*****
平均円周力	Ft	N	1898,1412	1874,5857	4349,0389	4316,3164
許容円周力	Ftlim	N	8980,7711	8712,2412	8480,8780	13978,8459
歯面強さ	Sfc	---	4,7564	4,6476	1,9452	3,2382
ヘルツ応力	σ_H	MPa	599,5571	591,4226	914,1716	730,2053

図 54.19 強度計算結果 (歯面)

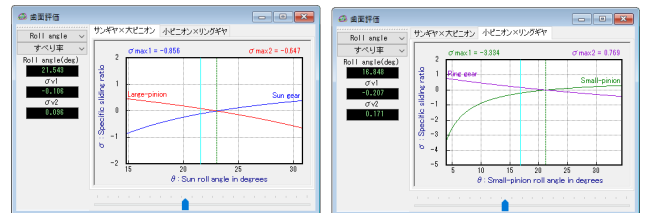
54.8 歯面評価

歯面評価では、すべり率、ヘルツ応力、油膜厚さ、接触温度、すべり速度の各グラフとすべり速度図を表示します。これらの計算結果は、歯面修整には適応していません。また油膜厚さ、接触温度 (歯車温度+フラッシュ温度) は、AGMA2001-C95, Annex A に基づく計算結果です。そのため歯面修整量や荷重分担などを考慮した歯面応力および伝達誤差解析は 54.12 歯面応力&伝達誤差解析をお使いください。

図 54.20 の歯面評価設定時の油の種類は、鉱物油、合成油を選択でき ISO グレードも選択 (任意設定可) することができます。また、摩擦係数は、一定値、ISO, AGMA 方式の中から選択することができます。

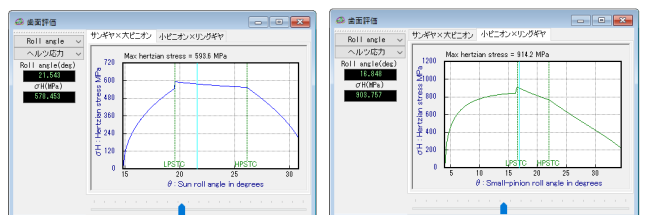
図 54.21~54.26 に、すべり率、ヘルツ応力グラフ等を示しますが、横軸目盛はロールアングルと作用線長さの切り換えができます。また、図 54.23 の油膜厚さから摩擦の発生確率を、図 54.24 の接触温度からスカuffingの発生確率を計算します。

図 54.20 歯面評価 (設定)



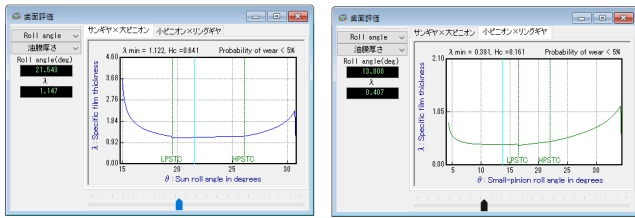
(a) 太陽×大ピニオン (b)小ピニオン×内歯車

図 54.21 すべり率

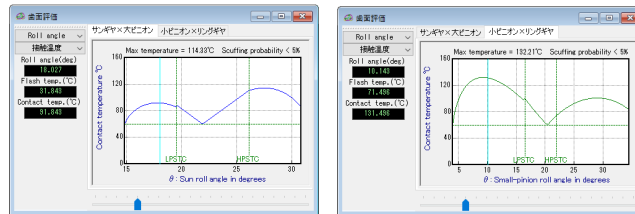


(a) 太陽×大ピニオン (b)小ピニオン×内歯車

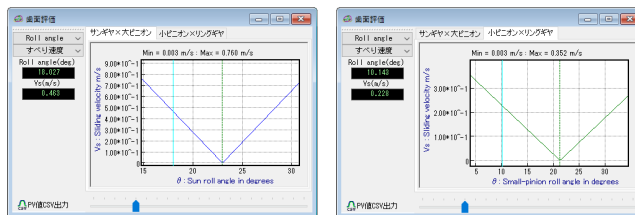
図 54.22 ヘルツ応力



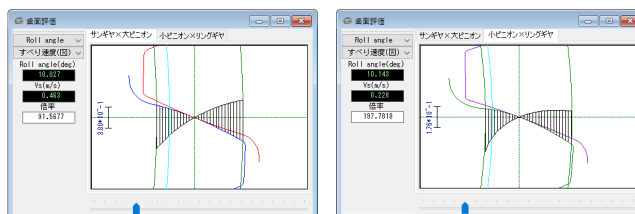
(a) 太陽×大ピニオン (b)小ピニオン×内歯車
図 54.23 油膜厚さ



(a) 太陽×大ピニオン (b)小ピニオン×内歯車
図 54.24 接触温度（歯車温度+フラッシュ温度）



(a) 太陽×大ピニオン (b)小ピニオン×内歯車
図 54.25 すべり速度 1



(a) 太陽×大ピニオン (b)小ピニオン×内歯車
図 54.26 すべり速度 2

54.9 HELP 機能

操作方法を知りたい場合は[HELP]機能を使うことができます。例えば、レンダリング表示について知りたい場合は、レンダリングフォームをアクティブにして[F1]キーを押すことにより図54.27のように説明画像を表示します。また、「ヘルプ」、目次、インデックスでも説明画面を表示することができます。

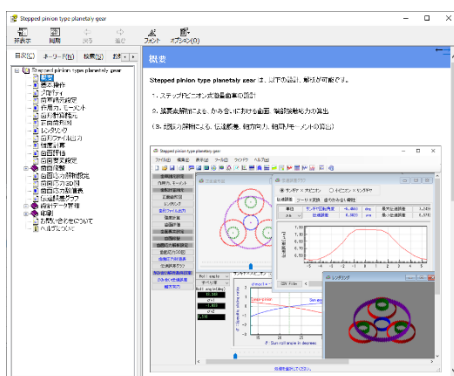


図 54.27 HELP 機能

54.10 歯面応力および伝達誤差解析（オプション）

この機能は、(1) 歯面修整の設定、(2) 歯面応力解析、(3) 伝達誤差解析をすることができます。

歯のかみ合いにおいてインボリュート面だけの接触だけではなく端部接触する場合があるため図 54.28 のように端部接触解析に「有効」、「無効」を設けています。また、ピッチ偏差も設定できるようにしています。



図 54.28 歯面要素設定

54.11 歯面修整（オプション）

歯面修整は、(1)歯形修整、(2)歯すじ修整、(3)歯面歯すじ修整、そして(4)データ読み込みの機能がありここでは、歯形修整の例を図 54.29 に示します。この歯形を得るためには図 54.30 で「歯形」を選択すると図 54.31 のように歯形修整を数値入力与えることもできますが、右側の図のようにパターン化した歯形に数値を入力して与えることもできます。また、図 54.32 のように csv ファイルを読み込む機能もあります。

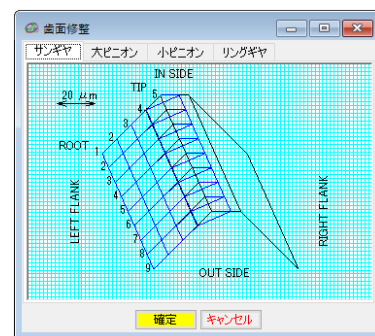


図 54.29 トポグラフ



図 54.30 歯形修整

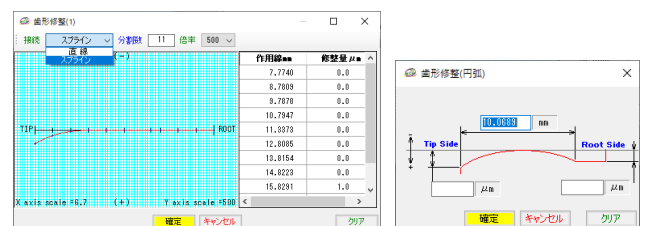


図 54.31 歯形修整

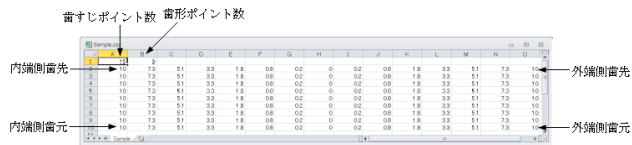


図 54.32 歯面修整データ (csv)

54.12 歯面応力&伝達誤差解析 (オプション)

太陽歯車に図 54.29 の歯先修整を施し、大ピニオン (大星歯車) にクラウニング 10 μ m を施した歯車の歯面解析例を以下に示します。ここでは、図 54.33 のように最大接触角を 40 分割し、太陽歯車と大ピニオンの食い違い誤差を $\phi_i=0.005^\circ$ として解析すると「太陽歯車×大ピニオン」の歯面応力分布は、食い違い誤差を与えているため応力発生場所は歯幅端部側に寄っています。しかし、歯形修整と歯すじ修整のため端部は強く接触していないことが分かります。一方、「小ピニオン×内歯車」は、図 54.35 のように無修整歯形であるため小ピニオンの歯元と内歯車の歯先で大きな応力が発生していることが分かります。このように歯面応力分布を知ることが適切な歯面修整を決定することができます。

解析角度項目	記号	単位	サンギヤ×大ピニオン	小ピニオン×リクギヤ
開始角度	θ_s	deg	-19.530	-23.509
終了角度	θ_e	deg	19.154	19.493
角度分割数	N	---	40	40
誤差項目	記号	単位	サンギヤ×大ピニオン	小ピニオン×リクギヤ
食い違い誤差	ϕ_1	deg	0.0050	0.0000
平行度誤差	ϕ_2	deg	0.000	0.000

図 54.33 歯面応力解析条件設定

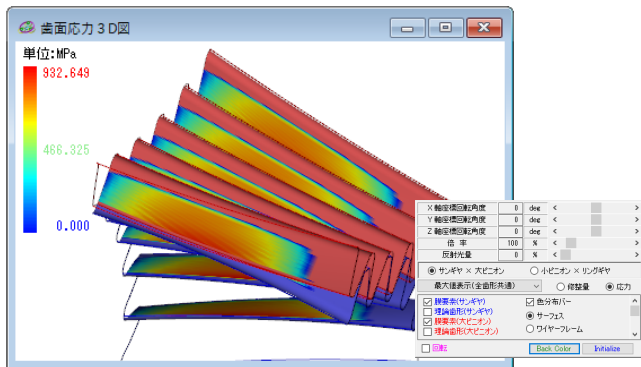


図 54.34 歯面応力 (太陽歯車×大ピニオン), $\sigma_{Hmax}=933MPa$

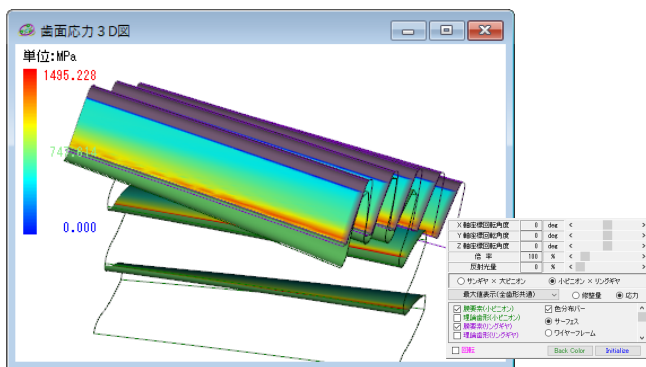


図 54.35 歯面応力 (小ピニオン×内歯車), $\sigma_{Hmax}=1495MPa$

歯面全体の応力分布 (セル表示) を図 54.36 および図 54.37 に示します。図 54.37 では無修整歯形のため太陽歯車の歯元 ($d_k=51.95$) で大きな応力を示していることが分かります。また、ここに表示している応力値は CSV ファイル「CSV出力」で出力することができます。また、各々の回転角時に応じた応力分布を連続して表示することができますので応力変化と接触位置や応力値を把握することができます。

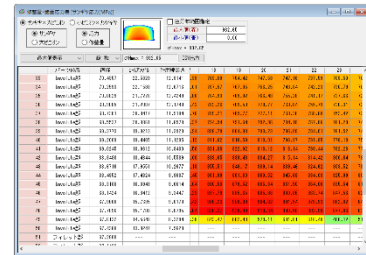


図 54.36 歯面応力 (太陽歯車×大ピニオン)

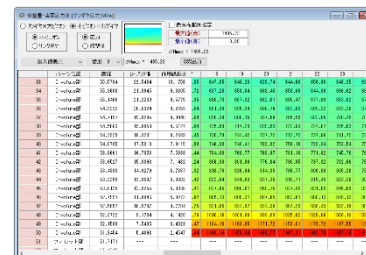
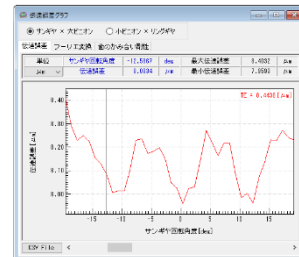


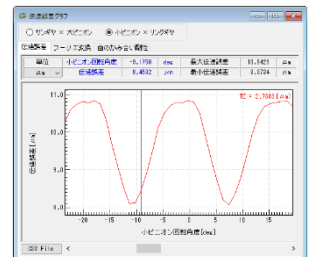
図 54.37 歯面応力 (小ピニオン×内歯車)

54.13 伝達誤差解析 (オプション)

歯面応力解析と同時に伝達誤差も解析します。図 54.38 に伝達誤差解析結果を、図 54.39 にフーリエ解析結果を示します。また、歯のかみ合い剛性解析も表示します。

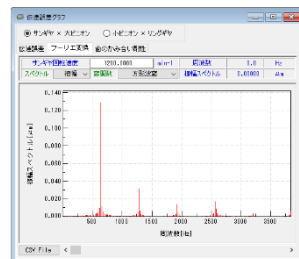


(a) 太陽×大 pinion, TE=0.44

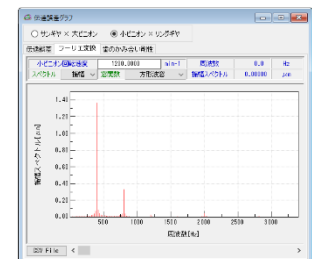


(b) 小 pinion×内歯車, TE=2.77

図 54.38 伝達誤差



(a) 太陽×大 pinion



(b) 小 pinion×内歯車

図 54.39 フーリエ解析

※ [5]遊星&不思議遊星と[49]遊星歯車の起振解析ソフトもご覧ください。

※ ステップドピニオン式遊星歯車は、[54]をご覧ください。

※ 3K 遊星歯車は、[58]をご覧ください。