[19] VGR ラック設計システム

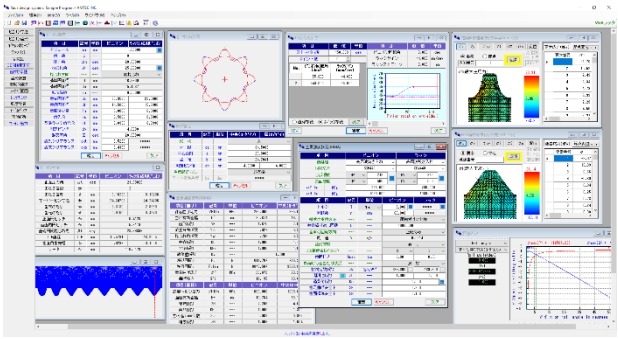


図 19.1　VGR ラック設計システム

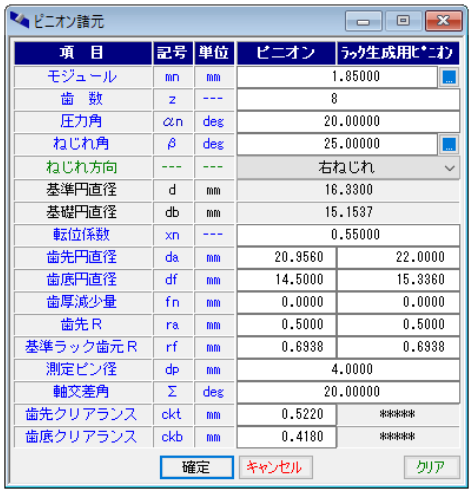
19. 1　概要

VGR（Variable Gear Ratio）ラック設計システムは，ピニオンを基準にして，ギヤレシオカーブに基づいて運動するラックの歯形を生成し，強度計算，FEM歯形応力解析，すべり率グラフなど，ヘルツ応力グラフを計算することができるソフトウェアです．全体画面を図19.1に示します．

CGR（Constant Gear Ratio）ラック設計システムは19.17に示します．

19. 2　ピニオンの諸元入力

ラックとかみ合うピニオンの諸元と，ラックを生成するためのピニオン諸元を入力します．図19.2にピニオン諸元の入力画面を，図 19.3 にピニオンの寸法を示します．



ピニオン諸元

項　目	記号	単位	ピニオン	ﾗｯｸ生成用ﾋﾟﾆｵﾝ
モジュール	mn	mm	1.85000	
歯　数	z	---	8	
圧力角	αn	deg	20.00000	
ねじれ角	β	deg	25.00000	
ねじれ方向	---	---	右ねじれ	
基準円直径	d	mm	16.3300	
基礎円直径	db	mm	15.1537	
転位係数	xn	---	0.55000	
歯先円直径	da	mm	20.9560	22.0000
歯底円直径	df	mm	14.5000	15.3360
歯厚減少量	fn	mm	0.0000	0.0000
歯先R	ra	mm	0.5000	0.5000
基準ラック歯元R	rf	mm	0.6938	0.6938
測定ピン径	dp	mm	4.0000	
軸交差角	Σ	deg	20.00000	
歯先クリアランス	ckt	mm	0.5220	*****
歯底クリアランス	ckb	mm	0.4180	*****

確定　キャンセル　クリア

図 19.2　ピニオン諸元の設定

ピニオン寸法

項　目	記号	単位	ピニオン	ﾗｯｸ生成用ﾋﾟﾆｵﾝ
正面圧力角	αt	deg	21.88023	
またぎ歯数	zm	---	2	
またぎ歯厚	W	mm	9.16236	9.16236
オーバーピン寸法	dm	mm	24.24706	24.24706
歯末のたけ	ha	mm	2.3130	2.8350
歯元のたけ	hf	mm	0.9150	0.4970
正面円ピッチ	Ps	mm	6.4128	
歯直角円ピッチ	Pn	mm	5.8119	
基礎円筒ねじれ角	βb	deg	23.39896	
TIF直径	TIF	mm	15.5791	16.2505
歯直角歯先幅	Sn	mm	0.9299	0.1006
リード	Pz	mm	110.0179	

図 19.3　ピニオンの寸法結果

19. 3　ピニオン歯形図

ピニオンの歯形図を図 19.4 に示します．図中，赤線は，ピニオンで青線はラック生成用ピニオンの歯形です．

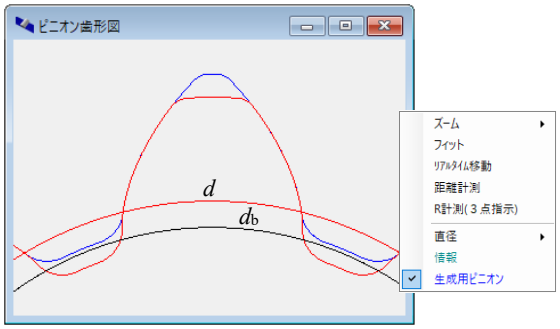


図 19.4　ピニオン歯形図

19. 4　ギヤレシオカーブ

ピニオンの回転角に対するラックゲイン（mm/rev）の数値を設定します．図 19.5 はスプライン曲線で，図 19.6(a)は直線接続グラフです．また，図 19.5(b)は，多点スプライン接続で回転角増加に伴いラックゲインが減少する設定例を示しています．

(1)　ストッパ位置
　ピニオンの最大回転角度をラック長としています．

(2)　図中の一点鎖線は，ころがり円がピニオン歯先円，基準円，基礎円のラックゲインを示します．

(3)　グラフ表示後，スクロールバーをスライドさせるとピニオン回転角とラックゲイン，ラックストローク値を表示します．

(4)　ギヤレシオを一定とすればCGR ラックとして設計可能です．

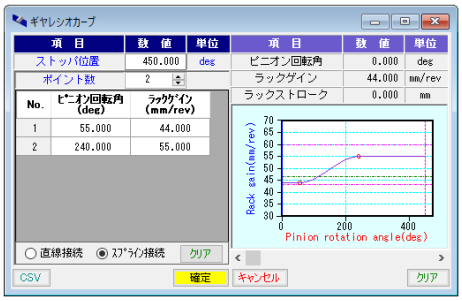
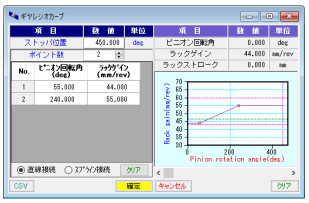
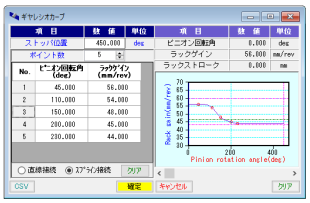


図 19.5　ギヤレシオカーブ（スプライン接続）



(a) 直線接続



(b) 多点スプライン接続

図 19.6　ギヤレシオカーブ

19. 5　ラックの諸元設定

ラックの諸元設定画面を図 19.7 に示します．ラックの基準角度の設定により，ラックの基準位置（ピニオン回転角 0 deg 位置）における中央断面の歯形が，歯山または谷を選択します．ラック寸法の計算結果を図 19.8 に示します．

ラック諸元

項　目	記号	単位	中央(ﾛｰｹﾞｲﾝ)	端(ｶｲｹﾞｲﾝ)
形　状	---	---	丸	
外　径	da	mm	34.5000	
中心距離	a	mm	23.0000	
歯　幅	b	mm	24.7841	
測定ピン径	dp	mm	4.0000	4.0000
角度設定方法	---	---	谷基準	
ラック基準角度	ba	deg	****	

確定　キャンセル　クリア

図 19.7　ラックの諸元設定

ラック寸法

項　目	記号	単位	中央(ﾛｰｹﾞｲﾝ)	端(ｶｲｹﾞｲﾝ)
モジュール	mn	mm	1.74739	2.15813
圧力角	αn	deg	5.80390	36.33868
ねじれ角	β	deg	3.52676	9.53842
ねじれ方向	---	---	左ねじれ	
ｵｰﾊﾞｰﾋﾟﾝ寸法	dm	mm	36.1366	34.2657
歯先高さ	ht	mm	32.5820	32.5820
ピッチ高さ	pt	mm	32.6268	30.3279
歯底高さ	hb	mm	29.2500	29.2500
軸方向ピッチ	Px	mm	5.5000	6.8750
歯直角ピッチ	Ph	mm	5.4896	6.7800
歯直角歯先幅	Sn	mm	1.7850	1.3490
正面かみ合い率	εα	---	1.0068	0.7263
重なりかみ合い率	εβ	---	1.2099	1.7409
総合かみ合い率	εγ	---	2.2167	2.4672

図 19.8　ラック寸法

19.6　VGR ラックの歯形創成図

ラック歯幅中央断面歯形の創成図を図 19.9 に示します．図の A は，ラック軸の中央位置であり B は，ストッパ位置を示します．この図左右の歯形の違いを確認することができます．

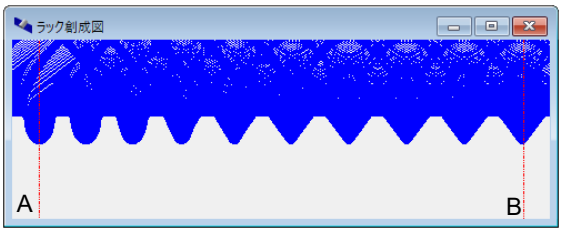


図 19.9　ラックの創成図

19.7　VGR ラックの 3D 歯すじ修整（オプション）

運転時の軸交差角誤差を考慮して図 19.10 のようにラックに歯すじ修整を与えることができます．ただし，図 19.10 はラック生成用ピニオンに歯すじ修整を与えています．

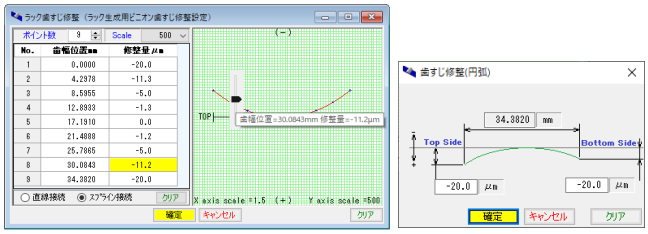


図 19.10　ラックの歯すじ修整

19.8　VGR ラックの 3D 歯形計算

歯形計算は，図 19.11 のように歯形の分割数を設定します．

歯形計算

項　目	分割数
ピニオン歯幅方向	50
ラック歯幅方向	50
ラック歯たけ方向	50
ラック歯先部	50
ラック歯元部	50

確定　キャンセル　クリア

図 19.11　歯形計算の設定

19.9　歯形 R 接続（オプション）

ラック歯形は運動から決まる図 19.9 の歯形となりますが，加工を容易とするため歯先および歯元を単一半径として与えることができます．ここでは，図 19.12 のように与えた例を示します．

ラック歯形 R 接続

項　目	記号	単位	数　値
歯先 R	ra	mm	0.5000
歯元 R	rf	mm	0.5000
歯先 R 分割数	---	---	90
歯元 R 分割数	---	---	90

確定　キャンセル　クリア

図 19.12　歯先 R，歯元 R の設定

VGR ラック歯形を図 19.13 に示します．そして，図中の□部を拡大した歯幅分割位置 1, 7, 15, 20 の歯形を図 19.14 に示します．この拡大図の歯先および歯元部は，理論歯形 ☑ Rack と図 19.12 で与えた単一半径（r_a=r_f=0.5mm）☑ R-Rack を重ねて表示しています．

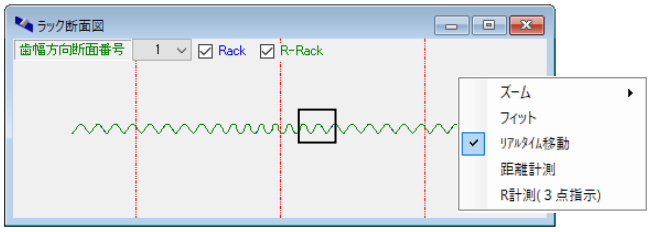
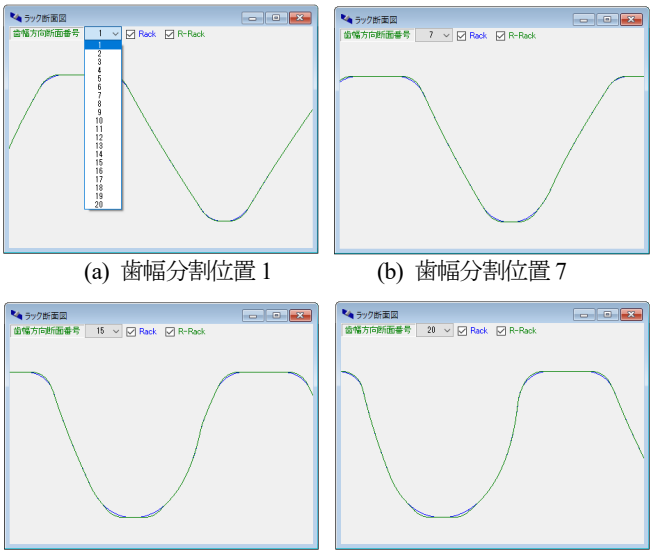


図 19.13　VGR ラック歯形（歯幅中央）



(a) 歯幅分割位置 1　(b) 歯幅分割位置 7

(c) 歯幅分割位置 15　(d) 歯幅分割位置 20

図 19.14　VGR ラック歯形拡大（図 19.13□部）

19.10　歯形レンダリング

歯形計算終了後，[レンダリング]ボタンを押すと，ピニオンとラックの歯形かみあい図を表示します．レンダリングは，座標軸の角度を変更することにより，視点を変えて観察することができます．

図 19.15 にピニオン上面から観たレンダリング図を示します．また，図 19.16 のラック背面から観察したレンダリングでは，かみあい接触線を観察することができます．また，図 19.16 の右に示すコントロールフォームでは①座標軸の角度変更，②ズーム，③背景色の設定，④ラックストロークチェックの機能があります．

ラックに図 19.10 の歯すじ修整を施した場合，図 19.16 のように歯幅中央部に接触線を確認することができます．

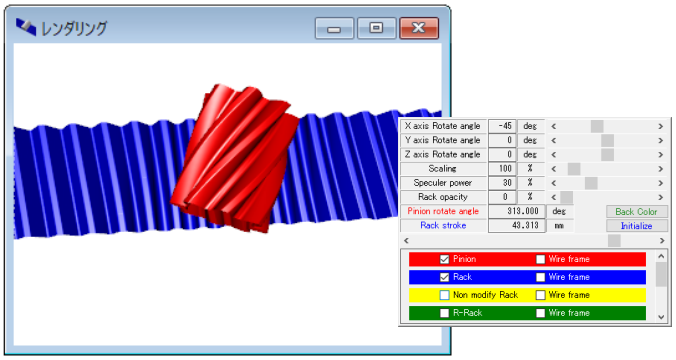


図 19.15　レンダリング（ピニオン上面から観察）

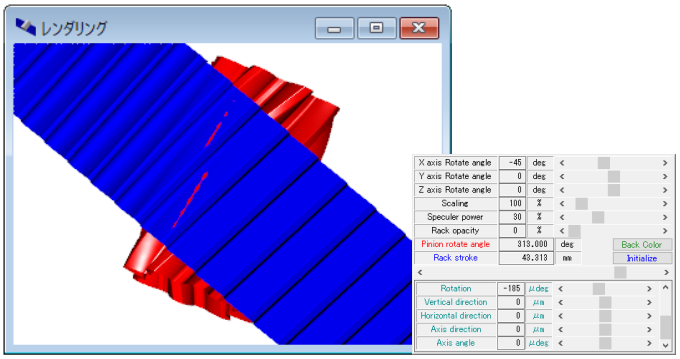
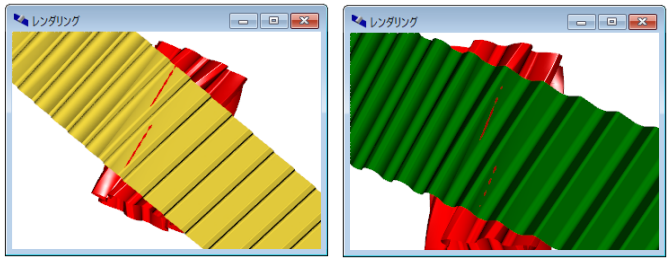


図 19.16　レンダリング（ラック歯すじ修整）

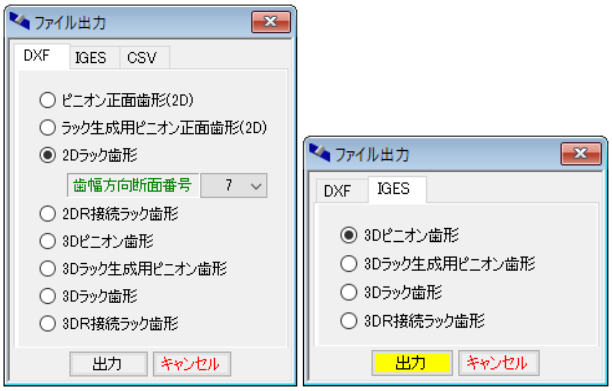


(a) ラック無修整　　(b) ラック修整，歯元 R

図 19.17　レンダリング

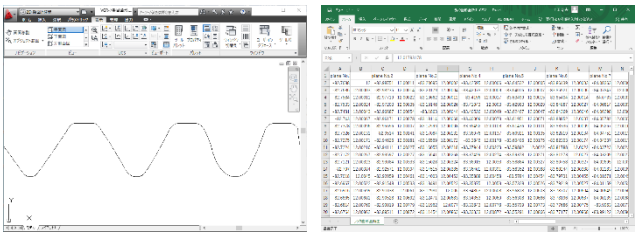
19. 11　ファイル出力

ピニオンと VGR ラックの歯形を DXF，CSV，IGES ファイルで出力することができます．ラック歯幅分割位置 7 歯形（DXF）を図 19.19(a)に，ラック歯形全断面座標（CSV）を図 19.19(b)に，ピニオン歯形の CAD 作図例を図 19.19(c)に，ラック歯形の CAD 作図例を図 19.19(d)に示します．

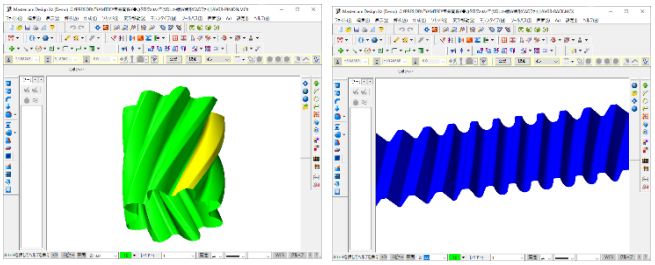


(a) DXF, CSV　　(b) IGES

図 19.18　CAD ファイル出力



(a)歯幅分割位置 7 歯形（DXF）　　(b) ラック歯形全断面座標



(c) ピニオン（IGES）　　(d) ラック（IGES）

図 19.19　CAD 作図例および CSV ファイル

19. 12　強度計算（JGMA，AGMA）

JGMA401-01，402-01 強度規格に基づいた計算結果を図 19.20～19.22 に示します．ラックの強度は，ラック中央部と端部の 2 箇所の歯形について強度計算をします．

図 19.20　強度計算設定

項目(曲げ)	記号	単位	ピニオン	中央(ﾛｰﾀﾞｲﾝ)
許容曲げ応力	σFlim	MPa	265.000	265.000
曲げ有効歯幅	b'	mm	20.614	13.774
歯形係数	YF	---	1.675	2.065
荷重分布係数	Yε	---	0.927	0.398
ねじれ角係数	Yβ	---	0.792	0.971
寿命係数	KL	---	1.000	1.400
寸法係数	KFx	---	1.000	1.000
動荷重係数	Kv	---	1.000	
呼び円周力	Ft	N	611.767	713.257
許容円周力	Ftlim	N	6848.507	9323.899
歯元曲げ応力	σF	MPa	23.672	20.272
曲げ強さ	Sft	---	11.195	13.072
項目(面圧)	**記号**	**単位**	**ピニオン**	**中央(ﾛｰﾀﾞｲﾝ)**
許容ヘルツ応力	σHlim	MPa	1069.000	1069.000
面圧有効歯幅	bw	mm	18.764	13.774
領域係数	ZH	---	2.296	4.075
寿命係数	KHL	---	1.000	1.300
かみ合い率係数	Zε	---	0.963	0.952
粗さ係数	ZR	---	1.012	1.005
潤滑速度係数	ZV	---	0.891	0.891
硬さ比係数	ZW	---	1.000	1.000
荷重分布係数	KHβ	---	1.000	1.000
動荷重係数	Kv	---	1.000	1.000
呼び円周力	Fc	N	612.370	
許容円周力	Fclim	N	1212.877	480.500
ヘルツ応力	σH	MPa	759.585	1206.808
歯面強さ	Sfc	---	1.981	0.785

図 19.21　強度計算結果（ラック中央部）

金属強度結果[JGMA]

項目(曲げ)	記号	単位	ピニオン	端(ｶｲﾀﾞｲﾝ)
許容曲げ応力	σFlim	MPa	265.000	265.000
曲げ有効歯幅	b'	mm	20.614	20.730
歯形係数	YF	---	1.675	2.065
荷重分布係数	Yε	---	0.927	1.520
ねじれ角係数	Yβ	---	0.792	0.921
寿命係数	KL	---	1.000	1.400
寸法係数	KFx	---	1.000	1.000
動荷重係数	Kv	---	1.000	
呼び円周力	Ft	N	611.767	570.585
許容円周力	Ftlim	N	6848.507	4786.970
歯元曲げ応力	σF	MPa	23.672	31.587
曲げ強さ	Sft	---	11.195	8.390
項目(面圧)	**記号**	**単位**	**ピニオン**	**端(ｶｲﾀﾞｲﾝ)**
許容ヘルツ応力	σHlim	MPa	1069.000	1069.000
面圧有効歯幅	bw	mm	18.764	20.730
領域係数	ZH	---	2.296	1.954
寿命係数	KHL	---	1.000	1.300
かみ合い率係数	Zε	---	0.963	1.124
粗さ係数	ZR	---	1.012	1.016
潤滑速度係数	ZV	---	0.891	0.891
硬さ比係数	ZW	---	1.000	1.000
荷重分布係数	KHβ	---	1.000	1.000
動荷重係数	Kv	---	1.000	1.000
呼び円周力	Fc	N	612.370	
許容円周力	Fclim	N	1212.877	2310.481
ヘルツ応力	σH	MPa	759.585	550.343
歯面強さ	Sfc	---	1.981	3.773

図 19.22　強度計算結果（ラック端部）

AGMA2001-C95 強度規格に基づいた計算結果を図 19.23～19.26 に示します．ラックの強度は，ラック中央部と端部の 2 箇所の歯形部について強度計算をします．

図 19.23　強度計算設定

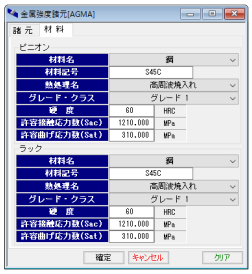


図 19.24　材料設定

項 目	記号	単位	ピニオン	中央(ﾛｰﾀﾞｲﾝ)
有効歯幅	F	mm	24.7841	24.7841
周 速	vt	m/s	0.0514	
接線荷重	Wt	N	611.7397	
歯面強さ	**記号**	**単位**	**ピニオン**	**中央(ﾛｰﾀﾞｲﾝ)**
弾性係数	Cp	√MPa	190.1995	
幾何係数	I	---	0.2982	0.1973
硬度比係数	CH	---	1.0000	
歯数比係数	CG	---	0.9921	
歯すじ修正係数	Cmc	---	0.8000	
ピニオン形状係数	Cpf	---	0.1266	
ピニオン位置係数	Cpm	---	1.0000	
かみ合い精度係数	Cma	---	0.0799	
かみあい修正係数	Ce	---	0.8000	
応力繰り返し係数	ZN	---	1.0000	1.3104
許容接触応力数	Sac	MPa	1210	1210
接触応力数	Sc	MPa	497.7698	713.3990
許容接触荷重係数	Kac	MPa	5.7562	3.8093
接触荷重係数	K	MPa	1.5221	2.0680
許容伝達動力	Pac	kW	0.1188	0.0993
歯面強さ(Pac/P)	SFc	---	3.7818	3.1617
サービスファクタ	Csf	---	1.5625	2.6832
曲げ強さ	**記号**	**単位**	**ピニオン**	
リム厚さ係数	KB	---	1.0000	1.0000
幾何係数	J	---	0.5416	0.2528
応力繰り返し係数	YN	---	1.0176	1.2635
許容単位荷重	Uat	MPa	111.5093	58.6711
単位荷重	UL	MPa	13.3420	16.4689
許容曲げ応力数	Sat	MPa	310	310
曲げ応力数	St	MPa	30.1966	87.9591
許容伝達動力	Pat	kW	0.2626	0.1119
曲げ強さ(Pat/P)	SFt	---	8.3578	3.5625
サービスファクタ	Ksf	---	1.2766	1.2791

図 19.25　強度計算結果（ラック中央部）

項 目	記号	単位	ピニオン	端(ｶｲﾀﾞｲﾝ)
有効歯幅	F	mm	24.7841	24.7841
周 速	vt	m/s	0.0514	
接線荷重	Wt	N	611.7397	
歯面強さ	**記号**	**単位**	**ピニオン**	**端(ｶｲﾀﾞｲﾝ)**
弾性係数	Cp	√MPa	190.1995	
幾何係数	I	---	0.2982	0.1245
硬度比係数	CH	---	1.0000	
歯数比係数	CG	---	0.9921	
歯すじ修正係数	Cmc	---	0.8000	
ピニオン形状係数	Cpf	---	0.1266	
ピニオン位置係数	Cpm	---	1.0000	
かみ合い精度係数	Cma	---	0.0799	
かみあい修正係数	Ce	---	0.8000	
応力繰り返し係数	ZN	---	1.0000	1.3104
許容接触応力数	Sac	MPa	1210	1210
接触応力数	Sc	MPa	497.7698	718.5885
許容接触荷重係数	Kac	MPa	5.7562	2.4027
接触荷重係数	K	MPa	1.5221	1.3241
許容伝達動力	Pac	kW	0.1188	0.0979
歯面強さ(Pac/P)	SFc	---	3.7818	3.1162
サービスファクタ	Csf	---	1.5625	2.6832
曲げ強さ	**記号**	**単位**	**ピニオン**	
リム厚さ係数	KB	---	1.0000	1.0000
幾何係数	J	---	0.5416	1.0404
応力繰り返し係数	YN	---	1.0176	1.2635
許容単位荷重	Uat	MPa	111.5093	244.4112
単位荷重	UL	MPa	13.3420	10.6672
許容曲げ応力数	Sat	MPa	310	310
曲げ応力数	St	MPa	30.1966	13.6764
許容伝達動力	Pat	kW	0.2626	0.7198
曲げ強さ(Pat/P)	SFt	---	8.3578	22.9124
サービスファクタ	Ksf	---	1.2766	1.2807

図 19.26　強度計算結果（ラック端部）

19. 13　評価グラフ（すべり率，ヘルツ応力）

ラック軸中央のかみ合い位置とストッパ位置でのかみ合いにおけるすべり率およびヘルツ応力を図 19.27～19.30 に示します．図 19.27 のピニオン歯元で大きなすべりが発生しています．

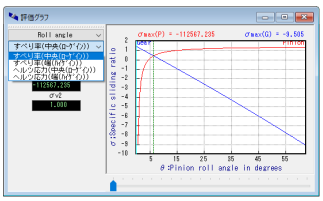


図 19.27　すべり率（中央）

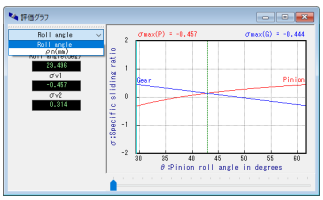


図 19.28　すべり率（端部）

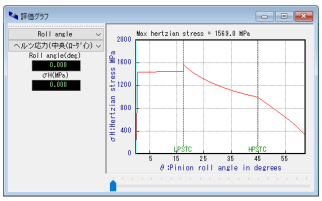


図 19.29　ヘルツ応力（中央）

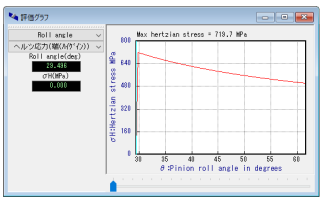
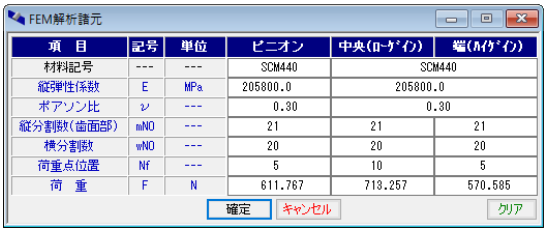


図 19.30　ヘルツ応力（端部）

19. 14　FEM 歯形応力

強度計算終了後，ピニオンと VGR ラックの 2 次元 FEM 歯形応力解析を行うことができます．図 19.31 に，FEM 解析の設定画面を示します．縦弾性係数，ポアソン比，分割数および荷重点位置そして荷重（変更可能）を与えることで応力を解析（σ_x ,σ_y ,せん断応力 τ，主応力 σ_1, σ_2）します．

ピニオンの最大主応力 σ_1 の応力分布図を図 19.32 に，VGR ラックの応力分布図を図 19.33 および図 19.34 に示します．



項 目	記号	単位	ピニオン	中央(ﾛｰﾀﾞｲﾝ)	端(ｶｲﾀﾞｲﾝ)
材料記号	---	---	SCM440	SCM440	
縦弾性係数	E	MPa	205800.0	205800.0	
ポアソン比	ν	---	0.30	0.30	
縦分割数(歯面部)	mNO	---	21	21	21
横分割数	wNO	---	20	20	20
荷重点位置	Nf	---	5	10	5
荷 重	F	N	611.767	713.257	570.585

確定　キャンセル　クリア

図 19.31　FEM 解析諸元

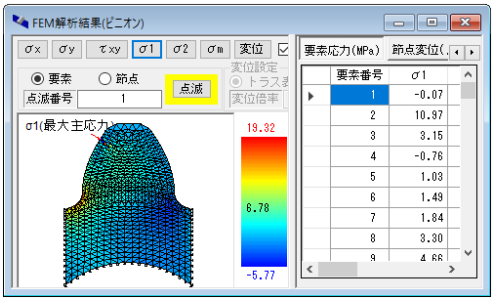


図 19.32　FEM 解析（ピニオン），σ_{1max}=19.3MPa

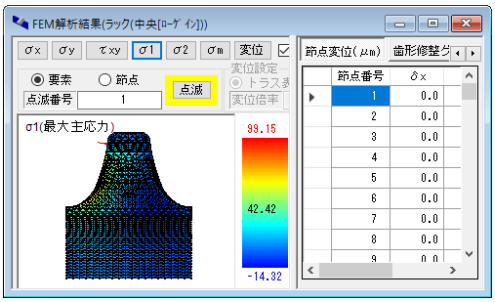


図 19.33　FEM 解析（ラック，中央），σ_{1max}=99.2MPa

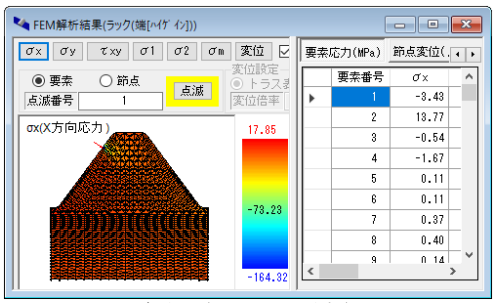


図 19.34　FEM 解析（ラック，端部），σ_{xmax}=17.9MPa

19.15　OBR 軸間変位（オプション）

ラック製造時，ラックのオーバーボール寸法（OBR）が，図 19.35 のように変化したときのラック歯形を生成します．なお，図 19.35 の歯溝番号は，図 19.36 のように回転角 0°を歯溝番号 1 としています．

図 19.5 のギヤレシオカーブ基準の歯形と図 19.35 ラックのオーバーピン寸法変化による歯形を重ね合わせた歯形を図 19.37 に示します．

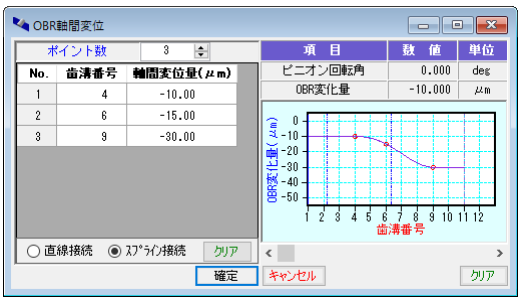


図 19.35　ラックのオーバーピン寸法変化

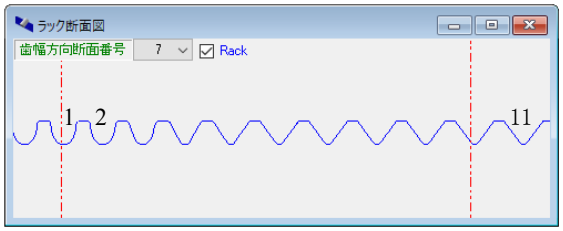
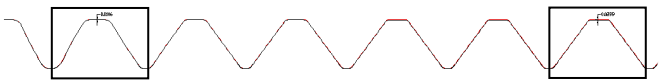


図 19.36　VGR ラック歯形（歯幅 7 番目）

基準歯形と OBR 調整歯形の重ね合わせを図 19.37 に示します．そして図中の(a)と(b)部分の拡大歯形を図 19.38 および図 19.39 に示します．図 19.39 では基準歯形と OBR 調整歯形の違いは歯先で 0.03mm ありますが，この大きさは図 19.35 ラックのオーバーピン寸法変化で 9 溝目の OBR 変化量と一致しています．



(a)　(b)

基準歯形と OBR 調整歯形の重ね合わせ

図 19.37　VGR ラック歯形（歯幅 7 番目）

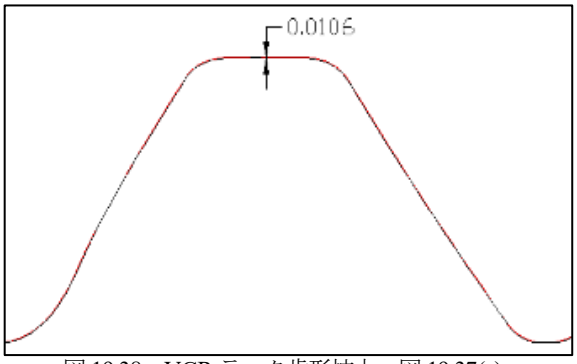


図 19.38　VGR ラック歯形拡大，図 19.37(a)

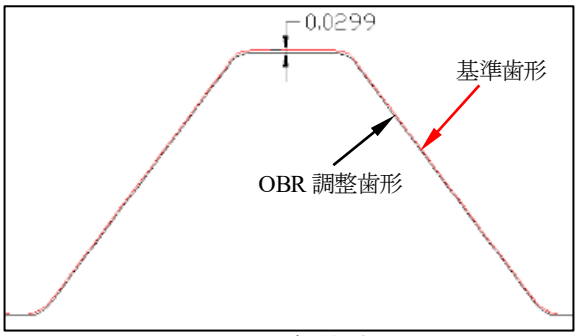


図 19.39　VGR ラック歯形拡大，図 19.37(b)

19.16　その他機能

図 19.40 にヘルプ機能，図 19.41 に操作説明を示します．

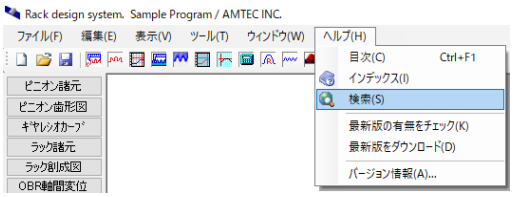


図 19.40　ヘルプ

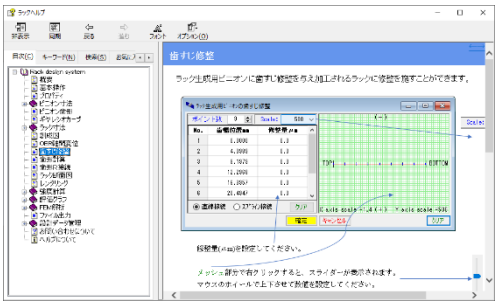


図 19.41　操作説明

19.17　CGR ラック設計システム

ピニオン諸元を図19.2としたときピニオンの寸法と歯形は同じでラックゲインの与え方が VGR ラックと異なります．今，ラックゲインを図 19.42 および図 19.43 のように RG=46.673mm/rev としたときの計算結果を図 19.44～19.46 に示します

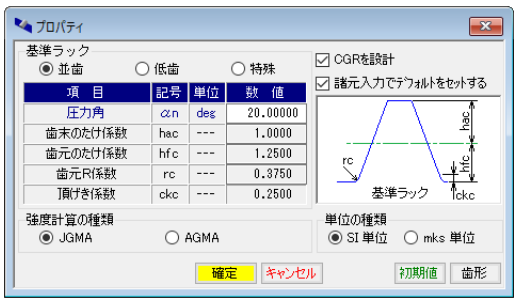


図 19.42　プロパティ（CGR ラックの設定）

図 19.43　ラックゲインと諸元設定

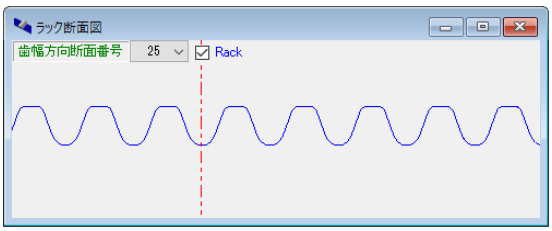


図 19.44　CVGR ラック歯形

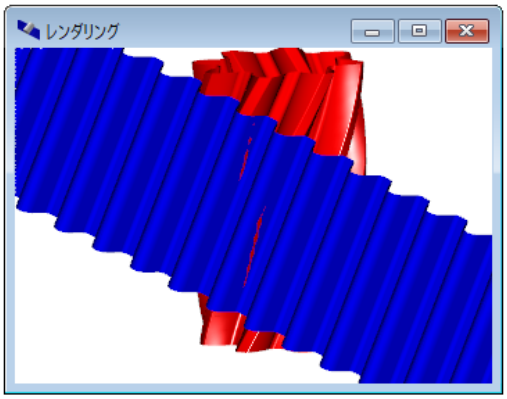


図 19.45　レンダリング

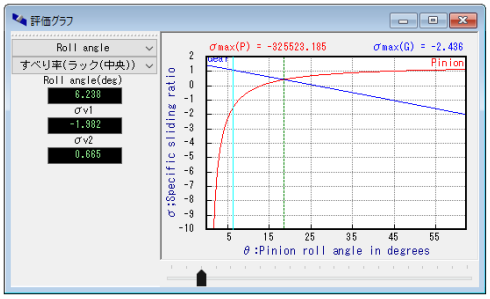


図 19.46　すべり率

ラックゲインを RG=55mm/rev としたときの計算結果を図 19.47～19.50 に示します．ラックゲインを変更することで歯形やすべり率が大きく変化していることが判ります．

CGR ラックのラックゲインの与え方は，図 19.5 のギヤレシオカーブで与えることも可能です．

図 19.47　ラックゲインと諸元設定

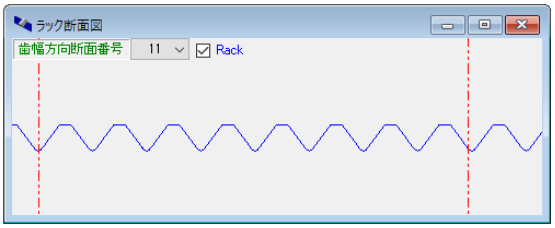


図 19.48　CGR ラック歯形

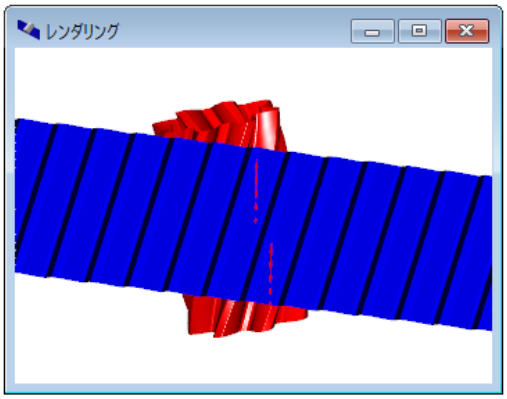


図 19.49　レンダリング（無修整）

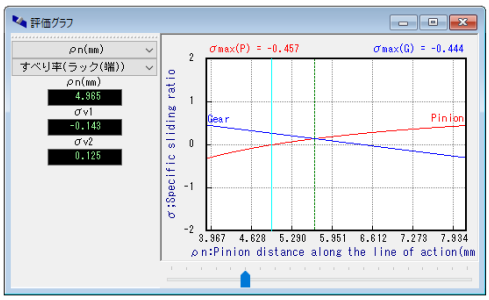


図 19.50　すべり率

その他の機能は VGR ラックと同じため省略します．