

解説 トヨタCARTレースシリーズ優勝支援の取り組み*

Technical Support Contributing to the Success of the Toyota CART Project

西 堀 一 好

Kazuyoshi NISHIBORI

DENSO has been supporting the Toyota CART Project from 1996. Toyota won both the Driver's Championship and Manufacturer's Championship in 2002 with DENSO after a 7 year challenge. This paper relates to the efforts of the technical support and its contribution to the success of the Toyota CART Project.

Key words : The Toyota CART Project, Technical support

1. はじめに

当社は1996年からトヨタCARTレースを技術支援してきた。トヨタは2002年シリーズ、7年目にして初めてドライバー部門と、マニファクチャ部門のシリーズダブルタイトル優勝を勝ち取ったがここに至る技術支援を紹介する。

1.1 2002年11月CARTシリーズ優勝祝勝会

2002年のCARTシリーズでエンジン製造部門の優勝とドライバー部門のダブルタイトルの祝うパーティにはこのプロジェクトに係わった200人以上の日本、米国の関係者が招かれ7年目のプロジェクトの成功を祝った。顔なじみの多くの人と祝杯をあげる中、デンソー製品の不具合発生で一番大変だった1999年の秋、米国のサーキットまで対策品を持ち込むべく日帰り出張した日のことが思い出された。

1.2 カリフォルニア・ラグナセカへの日帰りの出張

1999年9月23日金曜日。私はラグナセカに向けてタクシーを走らせていた。ラグナセカはサンフランシスコの南、約300kmのCARTシリーズ第12戦が行われるサーキットがあった。このところトヨタのエンジンは出力の向上が目覚しかったものの、エンジン振動増大によるトラブルが毎レース続いていた。その一つがデンソー製スロットルセンサの問題であった。これまで、なんとか暫定対策で乗り切ってきたものの、2週間前のバンクーバGPではついにエンジン振動に耐え切れずレース・リタイアを発生させてしまった。デンソー製品による2レース連続リタイアは絶対回避しなくてはと、とにかく対策品を送付し日本からレースを見守る予定であった。

ところが、レース二日前に、技術部の人とその原因を議論していた時、破壊に至るメカニズムで見逃して



図1 トヨタCART

いた点に気がついた。「このままではデンソー製品の責任によるリタイアが2レース連続して発生してしまう。」と血の気が引いた。やっとトヨタエンジンが4年の長い道のりを1ステップずつ登りつめ表彰台を狙える今、4台のトヨタ車の1台からもラグナセカでリタイアを出してはいけない。特急の国際便を使ってレースには間に合わないことが分かったため、自分でその対策品を運ぶことを覚悟した。すぐ航空券の手配をし、土曜日の予選に間に合うよう出発した。

2. トヨタCARTレース支援の7年間の取り組み概要

トヨタCART支援の7年間は成長期と熟成期に分かれる。成長期の1996年～1999年までの4年間は急激な出力の向上でライバルに肉薄するも、製品環境のさらなる悪化でレース・リタイアを相次いで発生させ全く勝てなかった。熟成期は信頼性を向上させ、CART初優勝とシリーズ優勝をめざした2000年～2002年までの3年間であった。ここでは熟成期の信頼性向上の取り組みに焦点をあわせ紹介する。

* 2003年3月11日 原稿受理

	成長期				成熟期		
優勝	△	△	△	△	△	△	△
2位	○	○	○	○	○	○	○
3位	△	○	○	△	○	○	○
4位	●	●	●	●	●	●	●
	96	97	98	99	00	01	02

図2 1996～2002年のCARTマニファクチャ部門成績

2.1 1999年シーズンの成績・トヨタエンジン

冒頭のようにレース現場まで不具合対策品をハンドキャリーで届け、なんとか優勝の可能性に望みを託したラグナセカGPだったが、結局表彰台には上がれなかった。1999年の最終成績でも最高位4位と優勝にはほど遠かった。しかし最終戦のフォンタナ予選では初めてポールポジション（予選1位）をとったことから分かるようにトヨタエンジンの出力は確実に向上していた。燃料系、点火系、過給圧制御などは成長期の4年間で何百、何千ものエンジンと製品の改良、その組み合わせのシミュレーションとテストを反映しエンジン出力に関してはトップレベルのシステムに仕上がっていた。以下CARTレースの概要、トヨタCARTシステム、デンソーシステムを概略紹介する。

2.2 CARTレースの概要

CARTレースは米国を中心として行われるフォーミュラカーレースの一つで、米国のF1と呼ばれているほど人気と高いテクノロジーを競うレースである。トヨタは1996年からCARTに参戦したが、エンジン制御に関するシステムとその製品に関しては、デンソーが開発から実戦のレース現場までをサポートしてきた。

表1 F1とCARTの比較

	F1	CART
エンジン	NA3.0L 10気筒, 18000rpm以上	TURBO 2.65L 8気筒, 17000rpm
車両	600kg (ドライバー含む)	700kg (ドライバー含まず)
駆動制御	ギア, スロットル, クラッチ, デフ	制御無し
開催	ヨーロッパ中心	米国中心

2.3 トヨタCARTシステム

システムは大きく分けて車両とエンジンに分かれるが、CARTの場合車両側の制御は禁止されているため、制御はエンジンに集中することになる。車両にはいくつかのセンサが配置されているが、これらはデータとしてロギングされ、車両をセッティングする時に活用される。エンジン部と車両部はそれぞれ独立してロギング部を持っているがテレメトリに関しては車両ロギング部がエンジンの情報もまとめて無線機で送られる。

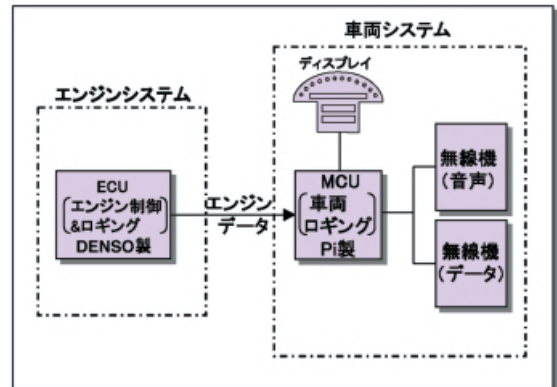


図3 トヨタCARTシステム



図4 トヨタCARTエンジン

2.4 デンソーシステム

エンジン制御とエンジンデータロギング部のソフトウェア、ハードウェアは当社で開発、サポートしている部分である。中心となるECUでは主に噴射制御、点火制御、ターボ制御を行っている。ターボ制御はDCモータによる電子スロットル制御、VSVによるウエストゲート弁制御を行っている。その他、回転角センサ、スロットルセンサ、インジェクタ、IGコイル、点火プラグなど20点、年間延べ約10,000点がデンソーの製品である。このシステムはIRL (Indy500) のシステムとして引き継がれ現在も活用されている。



図5 CART DENSO製品

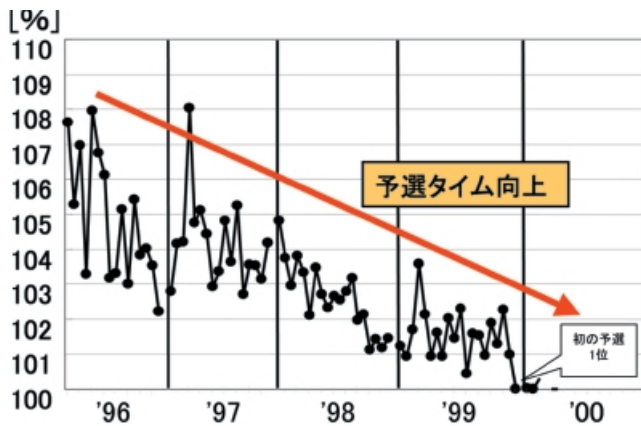


図6 予選タイムの向上 (TOPとの比率)



図7 初の予選1位時の順位揭示塔

2.5 レースマネジメント・信頼性

2000年年初、優勝できない一番の問題はリタイアの多さにあると思われた。トヨタの場合、通算80戦のうち、なんと1/2近く約40戦以上が、リタイア。その内エンジンとエンジン制御システムの不具合によるリタイアが20戦あることが注目された。トップチームのリタイアのほとんどが事故によるもので、内エンジンとエンジン制御システムの不具合によるリタイアが数件しかないことと大きな隔たりがあった。レースの信頼性はこの次で、とにかく早ければ良いと思われがちだが、信頼性が低ければ、積極的なレースマネジメントができないばかりでなくレースに加わることもできない。我々は4年目にして初めてレースにおける信頼性の重要性を身をもって学んだ。

デンソー製品に起因2件

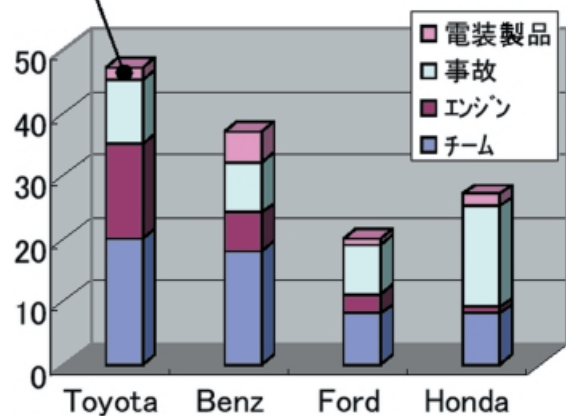


図8 1999年リタイアの件数, 内訳

2.6 2000年シーズンに向けてデンソーの取り組み目標

1999年シーズン、デンソー製品の不具合による本番レース2回のリタイアと年間43件の不具合を起こしていた。この状況から我々は2000年の目標としてデンソー製品の責任でのリタイア0件、不具合の発生は1/10の4件という目標を立てトヨタ初優勝に貢献しようとした。

表2 1999年の実績と2000年目標

	1999年の実績	2000年目標
レース・リタイア	2件	0件
製品不具合件数	43	4

2.7 CARTにおける走行の実際

CARTでは年間約20戦のレース決勝と予選とプラクティス(テスト)走行があり、1人のドライバーは約12,000mile走るといわれている。スペアカーを除いて2台の車両を持っているため、1台の車両では平均すると6,000mile程度の距離を走ることになる。またレースは300mile~500mileの距離を競っている。

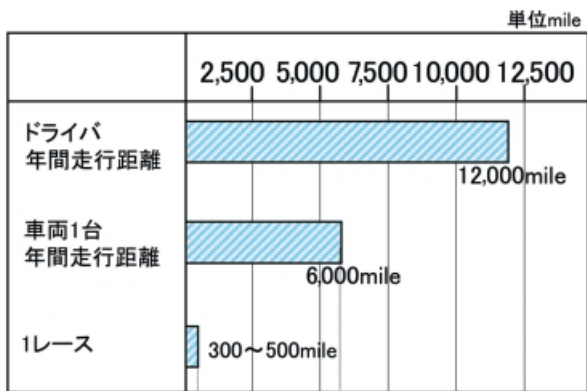


図9 CARTの走行距離

2.8 レース用電装製品に要求される信頼性

CARTレースは2~3時間のレースで、とにかく一番早くフィニッシュラインを越えれば良い。エンジンはギリギリまで無駄な贅肉をとり、レースが終わったところ寿命が尽きるようになっている。電装製品もCARTレースにみあった製品毎の交換インターバルで管理し、レースが終わった時、製品の寿命も尽きればよい。しかしレースエンジンは常に出力向上し、環境が変化しているため、1レース前までは問題がなかったものが、急に問題となることが多い。その製品のフ

ェイルがエンジンにとって致命的な不具合の場合、リタイアとなるため、電装製品の寿命を管理する上で難しい点である。

2.9 2000年信頼性向上の作戦

多くのCART製品を継続的に供給する中、2000年のCARTシリーズでは一挙にリタイア0件、レースウィークの不具合4件にレベル向上することは非常に難しいチャレンジだと言うことが分かってきた。全く寿命に余裕のない製品に関して、400ppm以上の信頼性を得ることに相当するからである。しかも、レース専用ラインとはいえすべて手作りの試作の工程であった。

2000年の二つの目標は

デンソー製品の責任によるリタイアは発生させない
レースウィークの製品不具合は4件以下

これらの課題に対して、二つの異なる作戦を考えた。

では製品が不具合を起こしても、絶対にエンジンを止めないようにシステムの強化を考えた。3ヶ月後の初戦までに部品レベルの恒久対策が完了しない可能性もあった。またではそのような小手先の対策は通用しないため、正攻法で確実に不具合を減らせていくというものであった。

2.10 リタイア0件への取り組み

2.10.1 システムの分析

エンジン制御システムに関してエンジン停止にいたる分析を行った。43件の製品不具合に関してそれぞれの製品ごとの不具合内容分析と各要因の不具合発生率の分析を行った。図10はそのときのFTAである。システムとその不具合の全体像を押さえる中で、各々の要因の発生確率の推定を行ったが、現在打たれている対策だけではリタイアの可能性が残ったため、センサの2重化によりシステムの信頼度を高める検討を行った。

2.10.2 2重化による信頼性向上

スロットルセンサは冒頭で紹介したとおり対策に次ぐ対策を何度も繰り返していたため、確からしい寿命を推定することは難しいと思われた。しかし、設変の経歴と不具合の一覧表を整理する中で、2000年度のスロットルセンサの信頼度を押さえるためには、対策品Aの1999年のデータを押さえることが有効であるこ

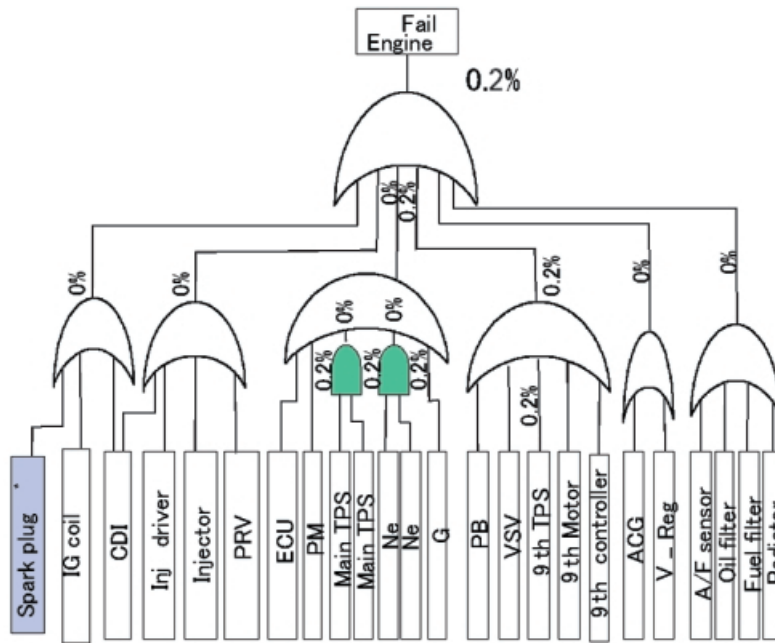


図10 システム検討と2重化の取組み

と、対策品Aが1999年夏から200個投入される中でデトロイトレースで対策Aの製品の1個347mileで摩擦形の断線が発生していることが分かった。

200個の対策品Aの母集団のなかで、一番寿命の短かったサンプルがデトロイトのレースに投入したものであった。ターミナル摩擦形断線不具合の200個の母集団は $m=3.5$ でワイブル確率に従うという仮定をおき平均寿命を求めたところ、対策品Aの平均寿命は1,200mile、 $\sigma = 325$ mileという結果を得た。

この寿命をもとに2重化の信頼度を求めたところ、200個の母集団の中で一番寿命の短いサンプルは1個の場合347mileであったが2重化すると700mileまで伸ばせることが確認できた。一番長い1500mileレースでも対策品Aの新品に交換すればエンジン制御システム全体でも99.8%の信頼度が確保できる。

年間20レース5人のドライバーの延べ100レースで0.2件の不具合リタイヤの可能性はあったが、エンジンがストールし、リタイヤの可能性が一番高かったスロットルセンサと回転角センサを2重系にすることにより2000年デンソー製品によるリタイヤ0件の目処が立った。この対策はエンジン側、ECU側でも同時に進める必要があったが、なんとか3月のレース初戦までに間に合った。

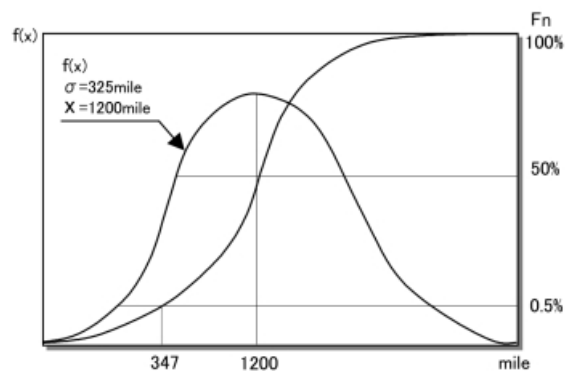
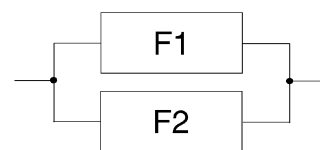


図11 スロットルセンサの寿命特性



$$F_{sys} = F1 \times F2$$

図12 スロットルセンサの寿命特性

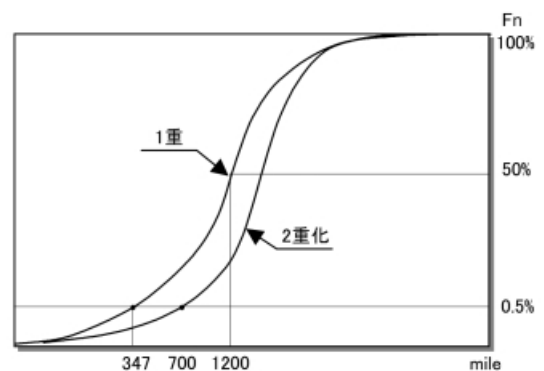


図13 スロットルセンサ2重化時の寿命特性

2.11 製品不具合4件以下への低減

この目標には、関係する技術部と製造部の関係者すべてが広範囲かつ継続的に取り組まなくてはならないため、レース関係役員をトップとし事業部長、技術部長をメンバーとするレース連絡会を2000年初、再組織した。従来は技術部の課長が責任者としてレース用の製品の開発を進めていたが、CARTに限っては部長が責任者になってもらうことにし、技術部担当者の活躍しやすい環境を配慮してもらった。そのレース連絡会で以下の方針を説明し全社的な広がりの中、取り組みを進めた。

- (1) すべての製品不具合はメカニズムに基づいた真の不具合原因まで調査する。
- (2) そのために、実験室で製品をレースと同じようにきちんと壊すことに注力する。
- (3) 何度も繰り返される中途半端な暫定対策はしない。製品開発はタイムリーに行い絶対に壊れないものを目指す。
- (4) 製品の寿命は常に最新エンジンで確認し、製品交換のインターバルに的確に反映する
- (5) 継続的に上記の技術項目と製造工程についてCARTレースの観点から信頼性点検を行う。

このように新しい取り組みがスタートした。絶対にエンジンより早く壊れない製品の開発もスタートしレース製品のレベルは確実に上がり、いつのまにか製品不具合が数えるほどに低減していった。



図14 トヨタCART初優勝

表3 2000年の目標と実績

	2000年の目標	2000年実績
レース・リタイヤ	0件	0件
製品不具合件数	4	3

2.12 2000年第5戦ミルオーキGP初優勝と2000年の結果

トヨタCART初優勝は2000年6月6日の早朝いきなりもたらされた。参戦から5年目。今年優勝できなければ、CARTは撤退というギリギリの状況での優勝ただけに、嬉しいというより、ホッとしたというのが実感だった。我々が2000年初から取り組んだ信頼性向上活動も徐々に成果を見せ始めたこともあり、この1勝を境にシーズンを終わってみると、5勝をあげることができた。また目標のデンソー製品によるリタイヤ0件、製品不具合4件もクリアした。

2.13 シリーズ優勝をめざし製品寿命向上と開発の加速

続く2001年のシーズンはシリーズ優勝を目指し更に厳しい信頼性目標を掲げて、取り組みをスタートさせると同時に、新たに製品寿命向上、寿命管理徹底による予算削減活動をスタートさせた。製品の信頼性が向上し、寿命が延びると、寿命いっぱい使うことができるようになり、予算の削減につながった。これらの活動がさらに新しい開発の加速につながり、トヨタ総合優勝を狙う活動として有効なものとなった。

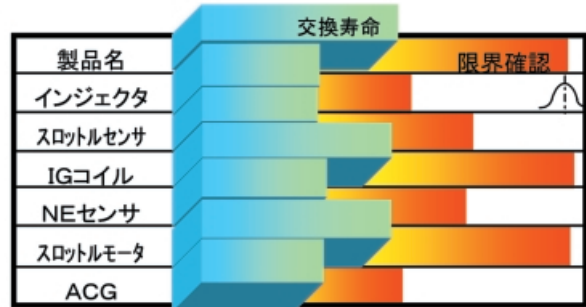


図15 製品の寿命と交換寿命

2001年のシーズンオフ、記者会見にて2003年からトヨタはCARTを終え、IRLのIndy500に参戦することを表明し、我々にとって2002年がモテギGPでの優勝とシリーズ総合優勝を狙うことができる最後の年となった。当社はこれまでの7年間で取り組んできたことをさらに徹底すべく、デンソー製品でのリタイヤは3年連続0。そして2001年は2件だったデンソー製品不具合も0という新たな目標をたて、関係者全員で取り組みをスタートさせた。

2.14 2002年，モテギ優勝とシリーズダブルタイトル

2002年は7年間CART参戦の最後の年にふさわしい収穫の年となった。これまで、一度も勝てなかったモテギでの初優勝，ダ・マッタのドライバー部門総合優勝，マニファクチャ部門のシリーズ優勝の他，最終戦での表彰台独占。19戦のうちトヨタが10回の優勝，トヨタ車9台の年間獲得ポイントは2位のホンダを大きく上回る333Pointとすべての結果が素晴らしいものであった。また我々がこだわってきた，信頼性目標もリタイヤは3年連続0件。そしてデンソー製品の不具合も0件というパーフェクトの結果にてトヨタCARTの支援を終えることができた。



図16 2002年トヨタCART優勝

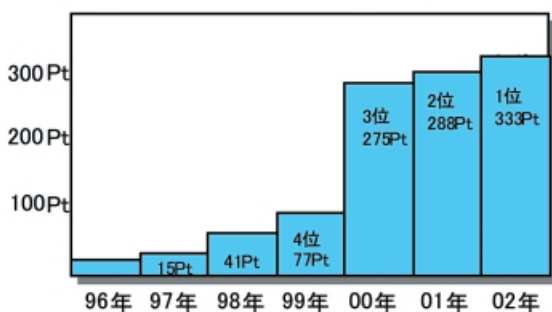


図17 トヨタCARTポイントの経緯

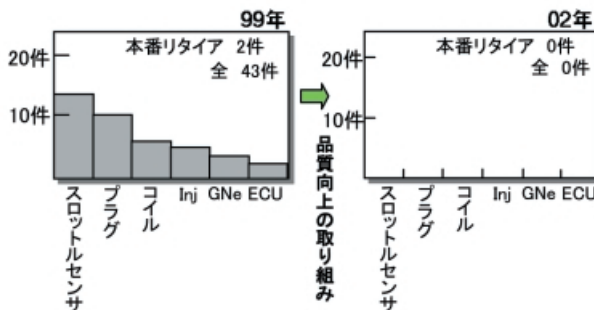


図18 デンソー製品品質

3. おわりに

CARTレースの極限の環境における製品設計は，従来の自動車環境を大きく外れた領域であったため，ほとんど従来のデータや従来の経験が利かない分野であった。当初は技術部に任せきりだったCARTレース製品ではあったが，問題発生を機に原理原則のところからMS (Motor Sport) 室の担当者と技術部担当者と一緒に一歩ずつ問題メカニズムを解き明かす取り組みを行ったことが印象に残る。一つの製品不具合の問題が解決してみれば，また新たな問題に直面したが，一つひとつ解決していくことによりトヨタCARTプロジェクトを最高の形で支援し終えることができた。我々はもちろんのこと，この業務に携わった関係者もレース以外では決して得られない貴重なものを学んだと確信している。

< 著 者 >



西堀 一好
 (にしぼり かずよし)
 第1開発部
 トヨタレース用製品の開発と支援業務に従事