

# “用心造物”的召唤： 绕制电机<sup>①</sup>，制作EV，冲向赛场！

[日] 木村英树 执笔 | 赵智敏 译

## 从发动机时代迈向电机时代

21世纪有望成为电动汽车(EV)时代。多少年来，汽油发动机和柴油发动机这两种内燃机一直是汽车的主要动力源。工业革命以来，利用化石燃料和大气中的氧气，发动机能够输出巨大的动力，人类的生产效率获得了飞速提高。而且，大量的人和物能够流动起来，我们的生活变得丰富多彩。

然而，随着世界人口的爆发式增长，加之发展中国家的汽车保有量迅速增长，结果是地球温室效应、石油资源枯竭等问题日益严重，不得不引起人们的深切关注。

在这样的时代背景下，能源利用效率占优的EV逐步走向实用化、普及化。EV是以电机驱动的汽车，有电池电动汽车(BEV)、油电混合动力汽车(HEV)、燃料电池汽车等。现在的电机可以将电能的90%以上(有些甚至超过95%)转换为动力，能源利用效率是发动机的2倍以上。这是电机可以炫耀的优势。

另外，电机还不需要空转(怠速)，从静止状态就可以输出很大的转矩；也不需要传递动力的离合器，起动变得非常简单。

还有，电机和发电机本就具有相同的结构，只要改变使用工况，就可以将汽车在行驶时的动能转换为电能，提取出来。

这种由再生制动产生的能量可以存储到电池里，在以后的加速中再利用。再生制动功能是EV的一大优势，这个功能对发动机而言，是无论如何也实现不了的。

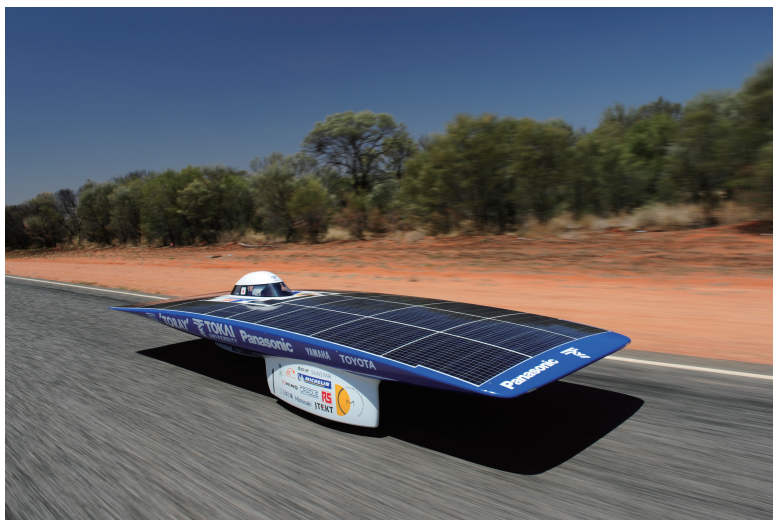


东海大学挑战中心“2009 Tokai Challenger”

为参加因穿越3000km 澳洲大陆而闻名的 World Solar Challenge<sup>②</sup> (时称 Global Green Challenge) 开发，采用夏普高性能太阳能电池，首次夺冠

① 本书内容提及的“电机”皆指“电动机”。

② 世界太阳能车挑战赛：World Solar Challenge, WSC。



东海大学挑战中心“2011 Tokai Challenger”  
为参加 World Solar Challenge 2011 而开发，为适应比赛规则的改变，采用了松下太阳能电池，并获得两连冠

## 学习电机技术和电子技术

EV 中应用了电机、逆变器、电池等多项与电气相关联的技术。

不过，这些技术里包含的电压和电流、永磁体和电磁铁的磁力线，是摸不着、看不见的东西，有一种很难理解的感觉。还有那些伟大的科学家发现的欧姆定律、左手定则、法拉第电磁感应定律、焦耳定律等，都与电机的性质有紧密的联系，很多人会觉得很难。

实际上，这些定律就是把电流和磁场之间的性质联系起来的单纯规律。对于这些专业术语，如果能够正确地理解它们的含义，那么几乎所有的现象都可以用算术水平的知识说明，这并不是多么难的事情吧？本书将通过图片等对 EV 及零部件做简单易懂的说明。

为了能够自由自在地操控 EV，要有能够控制电机电流的逆变器(电机控制器)。EV 主要使用三相交流逆变器，它把电池的直流电转换成使电机旋转的交流电。这是以晶体管技术为基础的电力电子学的典型应用。从家电产品到新干线，电力电子技术被广泛应用。电力电子技术也是实现节能的关键技术，是当今不可或缺的技术。

掌握不同电机的工作原理，并动手制作，让它实际运行，这是一件非常愉快的事情。最近，自己制作电动汽车的人数在不断增加，从所谓的“节能行驶”(Econo Move)的小型 EV，到把市售汽车的发动机和油箱换成电机和电池的改装 EV 等，各种各样的电动汽车陆续登场。



东海大学挑战中心“INAZUMA II”  
2015年5月，在秋田县大泻村的专用赛道举办的2015 World Econo Move Light 上夺冠



2015 World Econo Move Light 比赛开始时的情景

## 绕制电机，制作EV，参加比赛！

“从零开始制作EV？这是不可能的！”很多人会有这样的疑虑。CQ出版社为这些人推出了“CQ无刷电机和逆变器套件”，相关报道和书籍也一应俱全。以前较难找到的最新电机技术资料，现在连高中生和大学生也能轻而易举地找到了。电机中的线圈，怎样绕制好呢？最初也许会感到困惑，但经过几次实践就可以学会。

我们还准备了“CQ EV卡丁车套件”，在车体上组装电机，体验实际驾驶的乐趣，这样的时代已经到来。与汽车厂商生产的EV不同，EV卡丁车和无刷电机等都很简单，工艺也比较粗糙，但还是能够直接体验到电机的特性。

最近，驾驶EV卡丁车的机会多了起来，作为卡丁车爱好者的信息交流场所，“Econo Move Light”<sup>①</sup>节能EV比赛在日本秋田县大泻村“Solar Sports Line”赛道和千叶县“Sodegaura Forest Raceway”举办，并正在扩大影响。

希望读者通过本系列书，深入理解各种电机及驱动方面的电子技术知识，进一步做出自己独具特色的EV，最后来到赛场一较高下。



东海大学挑战中心“2013 Tokai Challenger”

为参加 World Solar Challenge 2013 而开发的赛车。为适应比赛规则的改变，从3轮变成4轮，结果很可惜，只获得第2名

### 笔者介绍



### 木村英树

东海大学  
工学部电气电子工学  
教授

东海大学挑战中心  
所长

<sup>①</sup> Econo Move Light 是基于 World Econo Move (WEM) 理念，并作为其初级赛事而设立的 EV 卡丁车比赛。——译者注

# 目 录

## EV 赛报

- 冠军和亚军之间的技术差距究竟在哪? .....001  
——从3000km太阳能车比赛“WSC”中看电子技术和汽车技术的应用

## 专题 驾驭 EV 无刷电机

- EV 电机的基础知识 ..... 011  
——电机和发动机的特性是完全不同的
- 使电机具备符合需求的特性 ..... 028  
——电压、电流、磁通的变化如何影响电机转动
- EV 比赛用电机的设计和调试 ..... 046  
——降低铁损和铜损,实现高效率
- 不同 EV 比赛中的电机选型与调试 ..... 059  
——不同赛道及不同比赛规则的针对性应对策略

## 特记 EV 制作挑战

- 高专一年级实践课程原创木制电动卡丁车的制作 ..... 066  
——EV教育:课程内容与学习套件的开发
- 力争EV比赛冠军,明确目标值,进行电机控制 ..... 082  
——2014年CQ EV卡丁车袖浦赛冠军报告
- 2014年CQ EV卡丁车袖浦赛赛事报道 ..... 097
- 通过电子技术优化电机性能 ..... 099  
——提高节能行驶比赛排名的方法
- 让无刷电机反转,并非反接电源就可以 ..... 106  
——为“CQ EV卡丁车”增加后退功能

## 测量仪制作

- 电机转矩测量仪的制作 ..... 113  
——成本 1 万日元,对额定输出功率100W级电机的测量精确度达到 99%

## 报告和评论

- 向全日本学生方程式EV锦标赛总冠军进发! ..... 120  
——旨在推进“用心造物”的技术比赛课题与对策

## EV 指南

- 自制 EV 零部件选购指南 ..... 125  
——以节能行驶EV和太阳能车为中心

## 冠军和亚军之间的技术差距究竟在哪？

——从 3000km 太阳能车比赛“WSC”中看电子技术和汽车技术的应用

〔日〕下迫正博 执笔 | 赵智敏 译 罗力铭 校

以太阳能为动力源，穿越 3000km 澳洲大陆的太阳能车比赛，每两年在澳大利亚举行一次。2015 年 10 月举行第 13 届比赛。在 2009 年、2011 年两届大赛上取得两连冠的日本东海大学队，能否继续在 2013 年的第 12 届比赛上夺冠，实现三连冠，成为人们关注的焦点（照片 1）。比赛中有多方面的较量，技术上也很有趣。笔者每次都去现场采访，现将 2013 年赛况予以报告。

（编者按）

### 什么是 WSC？

#### ● 迎来了开赛第 18 年的大陆穿越太阳能车挑战赛

具有 18 年历史的“世界太阳能车挑战赛”（World Solar Challenge, WSC），是使用自创的太阳能车，仅以太阳能为动力源，穿越澳洲大陆的比赛。具体情况是，从澳大利亚的北部城市达尔文市出发，到达南澳大利亚州的首府阿德莱德，全部赛程为 3000km（以斯图尔特高速公路为主），最先到达者获得冠军（图 1）。

澳洲大陆虽然有很多沙漠，但也不是每天都天

气晴朗，也有阴天和雨天。像这样，天气变化也是会影响太阳能车的。但不管怎样，参赛的太阳能车只能以太阳能转换而来的电能为动力源，向着终点行进。第一阵营大约需要 5 天才能到达终点。

该大赛是由冒险家 Hans Tholstrup 提倡创办的。1987 年举行第 1 届比赛，每 3 年举行一次，1999 年后改为每 2 年举行一次，到了 2015 年（10 月 18 日 ~ 25 日）已经是第 13 届了。

#### ● 真正的团队比赛

参加 WSC 比赛的太阳能车，除了安装有将太阳能转化为电能的太阳能电池，还安装了用来存储从太阳能转换而来的电能的蓄电池（二次电池）。太阳能车是由电机驱动行驶的。虽说是电动汽车，但为了最有效地利用能量密度较低的太阳能，不仅要在电子技术上下功夫，还要最大限度地对车身进行轻量化设计，以及减小空气阻力。因此，通常做成与普通汽车不同的特殊形状。因为赛程较长，参考其他队的行驶状况，并根据天气预报来计划太阳能车的行驶也是非常重要的。

例如，今后几天是有利于发电的持续晴天，就可以多使用电能，提高速度，快速行驶；如果是不利于发电的阴天或雨天，就要降低速度，合理使用电池的余量，以便在不发电的情况下也能够持续行驶。也就是说，电能的综合管理非常重要。不管怎样，这也是总行程为 3000km 的超长距离比赛，平均能量利用效率 0.1% 的差别，也会导致 3km 的差距。当然，不仅是效率问题，还存在速度等其他因素。

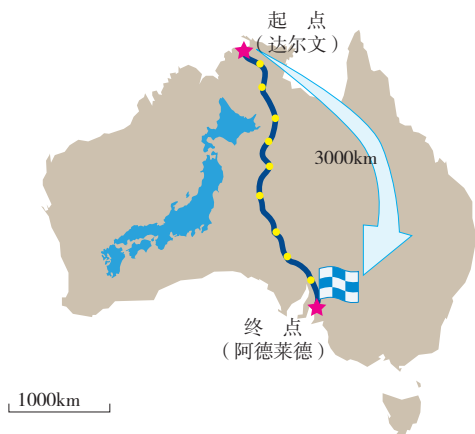


图 1 从澳大利亚的达尔文到阿德莱德的赛道  
黄色点是控制停车点



照片 1 即将从达尔文市出发的“Tokai Challenger”

参赛的太阳能车(几乎所有的)都是由1人驾驶。比赛在普通公路上进行,在太阳能车的前后有同队其他成员和监视比赛情况的观察员同乘的服务车同行。服务车上装有警示灯,并贴有提醒注意的警示标志,以提醒周围的普通汽车注意。服务车会根据道路和天气的情况为太阳能车提供行驶指示,同时也要处理太阳能车出现的故障等。

### ● 因为是在普通公路上举行的比赛……

因为是在普通公路上举行的比赛,社会车辆没有限行,正常行驶。当然,太阳能车驾驶员必须持有汽车驾驶执照,并遵守当地的道路交通法规。最高速度是由各州法律决定的,北部的北领地限速130km/h,南部的南澳大利亚州限速110km/h。有些小城镇<sup>①</sup>会限速50km/h左右。像这样在公路上举行赛车比赛,在日本几乎是不可能实现的。如果太阳能车也能像普通汽车那样在城市里到处穿行,能看到这样的景致也是一种奇妙的享受吧。

规定的比赛时间为上午8点到下午5点。下午5点左右结束当日的行驶,就近休息,并进行充电、车辆修整等工作。第2天的8点过后,就地开始继续行驶。如果运气好,下午5点左右正好经过的是一个小城镇附近;否则,整个赛程都得在野外露营(几乎全是沙漠地带)。比赛时段结束之后到日落,以及清晨到出发前(8点)的时间,都可以通过赛车上安装的太阳能板给电池充电。3000km赛程上设有9个控制停车点,根据比赛规则,在每个停车点必须休息30min。

### ● 最近,来自大学的参赛队增加了

比赛开办的前几年(20世纪90年代),GM、本田、丰田等汽车厂商和HOKUSAN(现改名为AIR WATER INC.)、京瓷等太阳能电池厂商的代表队也参加了比赛。之后,来自大学的参赛队(大学代表队)渐渐地成为主流。2001年以后,夺冠的

也是大学队了。但是,比赛是先进技术的竞争,在技术和资金层面,缺少了赞助企业的支持与协助也不行的。

为了赢得胜利,要开发出符合空气动力学要求的车身、最优的发电方式、符合天气变化的能源管理,从资金的筹集到寻求赞助,包括这些内容在内的与开发、运营相关的团队协作和运营管理等能力是不可或缺的。这也是将其称为“烧脑比赛”的原因。

下面介绍2013年第12届WSC。这届比赛的看点就是,在第11届、第12届比赛中夺冠的东海大学队能否实现三连冠(见表1)。

## 2013年WSC概述

### ● 大赛分为3个级别

从2013年起,WSC比赛分为以下3个级别。

#### (1) 挑战者级

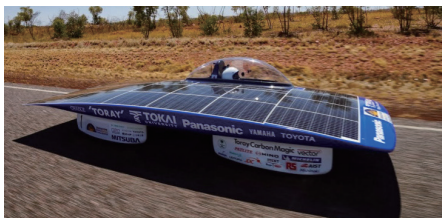
挑战者级是最为核心的比赛类型,是以从太阳能转换而来的能源为动力的竞速赛。挑战者级参赛车型为单座设计的太阳能车(照片2)。从2013年开始,比赛规定赛车必须是4轮车(此前多使用车轮行驶阻力、空气阻力较小的3轮车)。这是因为,要考虑以100km/h的速度在公路上行驶时的安全性。

#### (2) 巡航者级

这是2013年首次设置的比赛类型,目的是使车型更接近普通汽车。比赛途中,允许通过民用电源充电,巡航者级参赛车型为两座设计的太阳能车(照片3)。

#### (3) 冒险者级

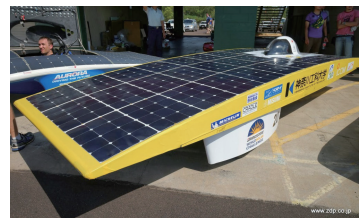
按照往届比赛规则制作的太阳能车也可以参赛的类型(照片4)。每届比赛都会对比赛规则做大幅修改,并不是所有参赛队每次都能开发出新的车辆,作为一个补救措施,2007年首次设置了这个类型的比赛。



照片2 挑战者级  
东海大学“Tokai Challenger”



照片3 巡航者级  
Soler Team Evolution“STELLA”



照片4 冒险者级  
神奈川工科大学“SIKIT II”

① 实际上就是一个有加油站和汽车旅馆,或者几户人家的聚落。每户人家都相隔几十公里。

表 1 WSC 历届冠军团队

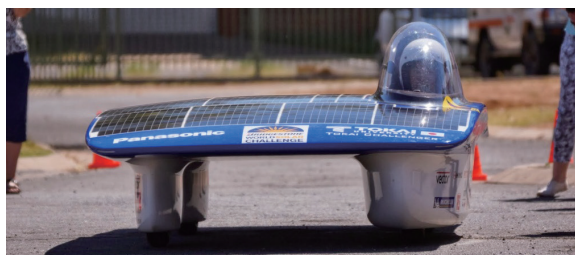
年份	冠军太阳能车	团队	国籍	用时 / (h:m)	平均速度 / (km/h)
1987	Sunracer	GM/Aero Viroment/Hughes Aircraft	美国	44:54	66.9
1990	Spirit of Biel	Biel School of Engineering and Architecture	瑞士	46:08	65.2
1993	Honda Dream	本田技研	日本	35:28	85
1996	Honda Dream	本田技研	日本	33:53	89.8
1999	Aurora 101	Aurora Vehicle Association	澳大利亚	41:06	73
2001	Nuna 1	Nuon Solar Team (Delft University of Technology)	荷兰	32:39	91.8
2003	Nuna 2	Nuon Solar Team (Delft University of Technology)	荷兰	31:05	97.02
2005	Nuna 3	Nuon Solar Team (Delft University of Technology)	荷兰	29:11	102.8
2007	Nuna 4	Nuon Solar Team (Delft University of Technology)	荷兰	33:00	90.87
2009	2009 Tokai Challenger	东海大学挑战中心	日本	29:49	100.54
2011	2011 Tokai Challenger	东海大学挑战中心	日本	32:45	91.54
2013	Nuna 7	Nuon Solar Team (Delft University of Technology)	荷兰	33:03	90.71



照片 5 2009 年“Tokai Challenger”



照片 6 2011 年“Tokai Challenger”



照片 7 2013 年“Tokai Challenger”

### ● 不断变化的比赛规则

比赛的主要类型——挑战者级历届冠军见表 1。随着太阳能车的性能提高，平均时速超过 100km 时，就接近公路的限制时速了。这样比赛就无法进行了。为了保证比赛的顺利进行，也考虑到安全，在此之

后举办的各届比赛，它们的规则都进行了大幅地调整。例如，2007 年比赛之后，每届比赛都进行了比赛规则的修改。

#### (1) 2007 年比赛

在上一届的比赛中，夺冠的 Nuon Solar Team 队“Nuna3”的平均时速已经超过 100km。为了限制车速，允许安装的太阳能电池板的面积由原来的 8m<sup>2</sup> 改为 6m<sup>2</sup>。同时，还对车手的坐姿、座椅角度等也进行了规定。以前为了减小空气阻力而采用的躺坐姿势，现在因为座舱空间的限制而不复存在。

#### (2) 2009 年比赛

东海大学队“Tokai Challenger”（照片 5）阻止了荷兰 Nuon Solar Team 队的五连冠，实现了 1996 年本田队夺冠以来的日本团队的再次夺冠。冠军车“Tokai Challenger”的比赛平均时速为 100.54km，再次超过 100km。

#### (3) 2011 年比赛

上届比赛之前，包括冠军车队在内，有一些团队使用了能量转换效率较高的化合物太阳能电池（转换效率约为 30%）。根据比赛规则，这些化合物太阳能电池面积不得超过 3m<sup>2</sup>。从实质上讲，这其实是在排斥化合物太阳能电池的使用。如果不是为了获得冠军，有哪个车队愿意使用价格昂贵的航天太阳能电池板呢？而与之不同的是，单晶硅太阳能电池（转换效率为 20%~22%）的面积限制不变，仍然为 6m<sup>2</sup>。虽然单晶硅太阳能电池与化合物太阳能电池存在性能差异，但对使用面积的限制不同，实际上单晶硅太阳能电池的电力输出能力反而比化合物太阳能电池高出 30% 左右。

采用松下 HIT 单晶硅太阳能电池的“Tokai Challenger”，以平均时速 91.54km 的成绩夺冠（照片 6）。

#### (4) 2013 年比赛

由于比赛规则强化了对安全方面的规定，一直以来作为主流的 3 轮太阳能车被禁用，参赛的车辆必须为 4 轮（照片 7）。同时，为了确保驾驶员的安全和视野，加大座舱盖也成了必然。

### ● 2013 年的技术趋势

#### (1) 车体形状

车体的结构已经很接近赛车了，它是由硬铝合金构成的框架结构和碳纤维材料构成的硬壳式结构所组成的。从 2013 年开始，此前一直作为比赛主流的 3 轮车被禁用。比赛规则强制要求使用 4 轮车。同时，还规定车体长度为 4.5m，比以前缩短了 500mm。

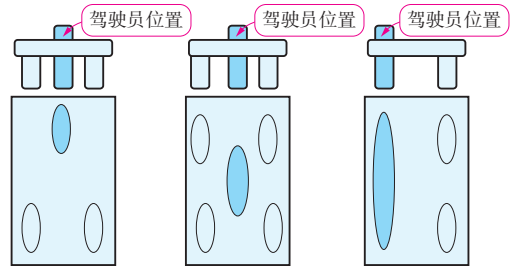
从 3 轮改为 4 轮后出现了两大课题。一是 4 个车轮与驾驶员座舱的配置，特别是座舱位置只能从车身下部突出。如图 2 所示，太阳能车的车轮数量为 3 时，可以将驾驶员座舱很好地配置在单轮前后。这样就可以减小前方投影面积。当太阳能车的数量为 4 轮时，可以考虑把座舱设置在左侧或右侧 2 轮之间，或者设置在车体的中部。前者的缺点是左右平衡受到破坏，对于 3000km 这样的长距离，总担心会对行驶性能产生影响。后者虽说是左右对称了，座舱配置在中央时，车身以下突出部分的空气阻力必然要比以往的 3 轮车型有所增加。但行驶的安全性比前者有所提高。

因此，有很多团队采用把驾驶室设置在单侧车轮的一侧（照片 8），有利于减小空气阻力。这种非对称车体被称为双体船车型，有不少参赛队采用这种车型。

另一个课题就是驱动轮的数量，这一问题将在后面叙述。

#### (2) 安全规定（视野）：加大并前移座舱盖

以前的规定为“眼睛能看到前方”。现在规定为视野必须确保能目视前方 4m 之处及下方 0.7m（眼



(a) 3 轮车型（对称） (b) 4 轮对称车型 (c) 4 轮双体船车型（非对称）

图 2 3 轮、4 轮和双体船车型的座舱配置比较

与 (b) 相比，(c) 的前面投影面积较小，且车体以下突出部分也可做得很小

点距 0.7m），也就是要求能够看到地面。因此，以前考虑空气阻力，在车体后部设置小座舱盖的方式已经不可取，现在必须采用较大的座舱盖，且位置从车体中部前移（照片 9）。

#### (3) 太阳能电池

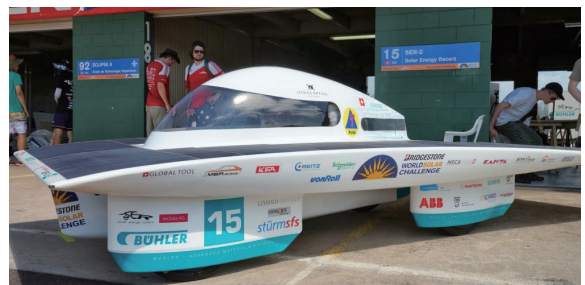
1987 年夺冠的车辆安装了化合物太阳能电池（几乎都是航天卫星上使用的），由于其价格昂贵、购买困难，单晶硅太阳能电池是 20 世纪 90 年代的主流配置。到了 21 世纪初，可以较低价配置化合物太阳能电池，很多成绩较好的队几乎都使用化合物太阳能电池。但自从 2011 年比赛规则设置了速度限制，单晶硅太阳能电池的使用再次成为主流。2013 年的参赛车辆，大都安装了 1100 ~ 1300W 的太阳能电池板（照片 10）。

#### (4) 集光器

有些方法可以增加太阳能采集能力，如不直接将太阳能电池张贴在车身的表面，而是让它们在行驶时收纳在车体内，早晚时段和控制停车时将它们延展开来进行充电的附加面板及镜面（反射板）等，其实都是用于扩大车体实际受光面积的。这些在以往比赛中都是被禁止的。另外，以往的比赛中规定，太阳能电池只能从化合物系和单晶硅系中选一种。2013 年的比赛对这些规则进行了修改，允许单晶硅

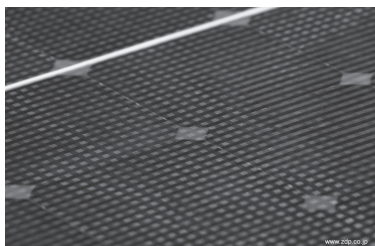


照片 8 双体船车型  
(瑞典延雪平大学) Solar Team

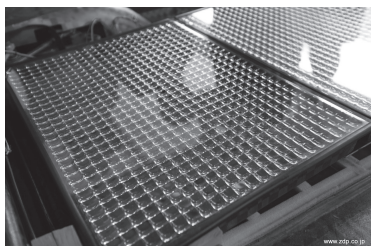


照片 9 大型座舱设置在前方  
Solar Energy Racers (瑞士)

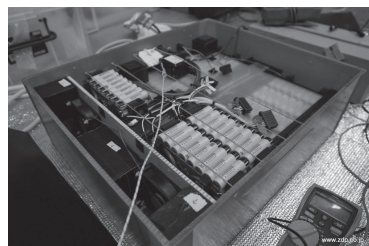




照片 10 单晶硅太阳能电池板  
（“Nuna7”）



照片 11 集光器（“Nuna7”）



照片 12 锂离子电池  
常用的是 18650 型（比 5 号电池大一圈的圆柱形）



照片 13 轮胎 + 轮毂电机（东海大学）

和化合物太阳能电池的混合使用。这样，就出现了在车体上安装单晶硅电池板的同时，安装化合物太阳能电池所需的集光器的汽车（照片 11）。

#### （5）蓄电池

20 世纪 90 年代，排名靠前的参赛队都是使用银锌电池，比较常见的锂离子电池从 1999 年左右开始成为主流（照片 12）。2013 年的参赛队，安装了约为  $5\text{kW}\cdot\text{h}$  的锂离子电池。另外，比赛规则并不限制锂离子以外的其他电池的使用，安装电池的数量取决于电池的种类和质量<sup>①</sup>。

#### （6）电机

为了彻底地追求效率，多数车辆采用无刷直流电机，取消了产生能量损耗的变速齿轮和传动链条，现在的主流方式是直驱——电机与车轮直接连接。

比赛规则规定必须使用 4 轮车，驱动轮的数量也是一个问题。正如前文所述，彻底追求效率的结果是，顶级太阳能车队使用的驱动电机，主流配置为无刷直流电机直驱方式。

以往的 3 轮车，一般配置为前面设置 2 轮，后面的 1 轮上安装电机。3 轮变成 4 轮后怎么办？可以有这些选择：2 电机 2 轮驱动、4 电机 4 轮驱动、

1 电机 2 轮驱动、1 电机 1 轮驱动。其中，由 4 轮中的 1 轮驱动的方式，从对称性方面考虑，会出现平衡问题。而 2 电机 2 轮驱动的方式和每个车轮安装 1 台电机的方式则更受认可。从控制和质量方面考虑，后面的 2 轮各安装 1 台电机的配置较为多见。

#### （7）轮胎

长达 3000km 的行驶距离，轮胎的滚动阻力也很关键。无论是哪个团队，都在寻找滚动阻力较小的轮胎，哪怕是小一点也好（照片 13）。虽是这么说，但由于这是在普通公路上进行的比赛，不同地方的路面状况也是有很大差别的，所以还必须研究爆胎的处理预案。

普利司通轮胎是 2013 年比赛的冠名赞助商，而排名靠前的参赛队主要使用的是米其林子午线轮胎。这种轮胎的滚动阻力仅为普通轮胎的 1/10，令人惊叹的是，即使与自行车、摩托车的轮胎相比，它的滚动阻力也要小得多。

## 在现场集结的太阳能车

### ● 冠军争夺者：荷兰“Nuna7”、美国“Generatio”

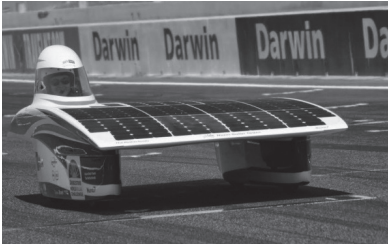
与东海大学队同样受关注的有 2009 年、2011 年比赛获得第 3 名的美国密歇根大学队（车名“Generatio”）和第 2 名的荷兰 Nuon Solar Team 队（车名“Nuna7”）。密歇根大学队资金雄厚，规模也远超其他队。两队的参赛车辆都采用了双体船非对称型车体（照片 14、照片 15）。

从比赛前的现场车检中了解到，“Nuna7”装载了集光器，这件事后来引发了争议。

### ● 头号冠军争夺者：东海大学队“2013Tokai Challenger”

志在夺得三连冠的东海大学在 2011 年车型的基

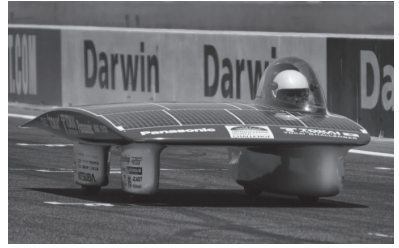
① 电池质量会计入车体总质量。——译者注



照片 14 Nuon Team “Nuna7”(荷兰)



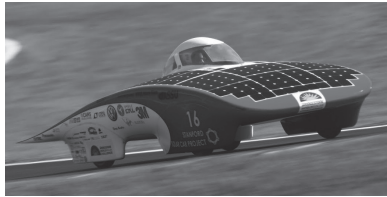
照片 15 密歇根大学“Generatio”(美国)



照片 16 东海大学“2013 Tokai Challenger”



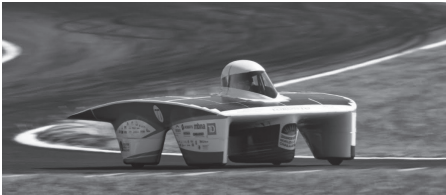
照片 17 Solar Team Twente “The RED Engine”(荷兰)



照片 18 Stanford Solar Car Project “LUMINAS”(美国)



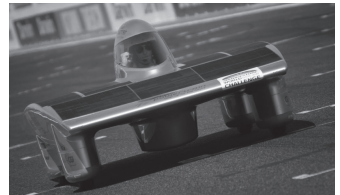
照片 19 “Team Allow”(澳大利亚)



照片 20 多伦多大学“Blue Sky Racing”(加拿大)



照片 21 “Onda”(意大利)



照片 22 Punch Powertrain Solar Team(比利时)

础上，为应对 4 轮规则，将车体改为双体船型（照片 16）。车身/底盘是东丽 Carbon Magic 公司制造的，材质为碳纤维，且在车身的不同位置使用了不同种类的碳纤维。

很多车都采用了美国 Sunpower 公司制造的太阳能电池。与上届相同，东海大学是唯一采用松下 HIT 太阳能电池的队伍。虽然从产品样本上看，HIT 太阳能电池单元的能量效率比 Sunpower 的略低一点，但从结构上看，HIT 太阳能电池具有高温时发电量降低少的特性。

### ● 黑马：荷兰 Twente 队和美国斯坦福大学队等

赛前，荷兰 Solar Team Twente 队（2015 年第 5 名）的“The RED Engine”（照片 17），还有斯坦福大学 Solar Car Project 的“LUMINAS”都被认为是争夺冠军的热门选手。“LUMINAS”的车体比较厚，并采用将座舱设置在中间的左右对称型结构（照片 18）。

如前所述，为了确保前方视野而将座舱设置在

稍微靠前位置的有瑞士“Solar Energy Racers”、意大利“Onda”、加拿大多伦多大学“Blue Sky Racing”，还有初次参赛的澳大利亚“Team Allow”（照片 19~ 照片 21）。

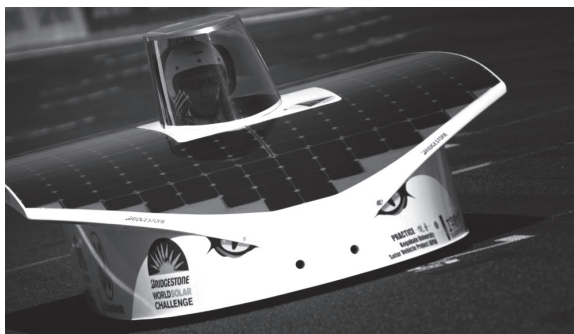
同样将座舱设置在中间，但采用比较薄的形状的有比利时 Punch Powertrain Solar Team（照片 22）。这是在 2007 年比赛中取得较好成绩的 Umicore 团队的基础上组建的比利时联合队。

### ● 来自日本的参赛队

除东海大学外，还有 2 支日本大学队参加了挑战者级比赛。其中有组队 5 年以来，初次参加 WSC 的工学院大学队“Practice”（骁勇）（照片 23）。该车可以说是受 GHCraft 株式会社<sup>①</sup>创始人木村先生的影响，由木村先生参与设计的 Salesio 工业高等专科学校的“Salesio”号改进而来的。它的车体采用了减小空气阻力的低重心设计，而且是本次比赛唯一采用普利司通子午线轮胎参赛的队伍。

金泽工业大学队“梦考房”号，是在获得 2012

① 日本的一家碳纤维公司。——译者注



照片 23 工学院大学队 “Practice”



照片 24 金泽工业大学队 “KIT Golden Eagle 5”



照片 25 在隐谷赛道预选赛上漂移的 “Tokai Challenger”

年铃鹿奥林匹克级太阳能车比赛亚军的 “KIT Golden Eagle 5”（照片 24）基础上，根据 WSC 比赛规则改装而成。

## “2013 Tokai Challenger” 比赛历程

### ● 预选赛出乎意料，东海大学仅获第 20 名

预选赛在达尔文市内的隐谷（Hidden Valley）赛道（1 圈 2.8km）举行，比拼行驶 1 圈所用的时间。决赛的出发顺序根据预选赛的名次确定。头号冠军争夺者东海大学队 “Tokai Challenger”，最后因过

弯角时速度太快而出现漂移（照片 25），虽然成功地再次起动，但浪费了很多时间。最终成绩为 2'46.7，比 2 年前的成绩落后了约 30s，结果仅获本级别的第 20 名，决赛时只能在最后出发。

挑战级的预选赛成绩排名如下：

- ① 澳大利亚 Team Arrow（2'00.1）
- ② 工学院大学（2'06.9）
- ③ 斯坦福大学（2'07.8）
- ⑤ 密歇根大学（2'13.5）
- ⑬ 荷兰 Nuon（2'35.5）
- ⑳ 东海大学（2'46.7）

### ■ 比赛第一天

#### ● 比头名晚 9 分钟出发，差距进一步被拉大

按前一天预选赛的排名，巡航者级比赛在达尔文时间上午 8:15 出发，挑战者级比赛是 8:30 出发。当初规定出发间隔是 1min，实际上是每隔 30s 出发一辆车。

天气晴朗，“Tokai Challenger”比头名澳大利亚队晚 9min 出发。2013 年比赛的路线与上届不同，出发不久后走的不是单向多车道的斯图尔特高速公路，而是走的单向单车道。这样一来，就无法对行驶速度较低的其他车辆实施超车，其结果就是比头名晚出发的车辆与行驶在前方的车辆的差距进一步被拉大。

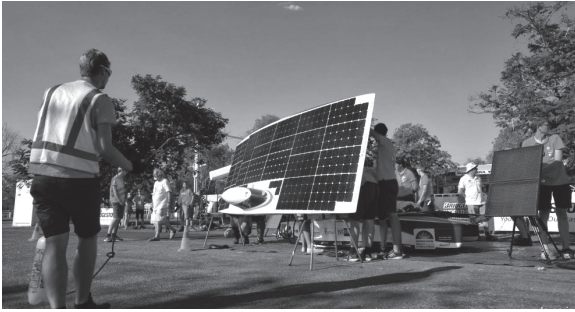
#### ● 以超过 100km/h 的速度追赶，到达第 1 个控制停车点

超车后，以超过 100km/h 的速度加速行驶，并在 12:51 以第 4 名的成绩到达第 1 个控制停车点——凯瑟琳（Katherine）（照片 26）。此地离出发地 316km。这样就可以与第一阵营同时出发了。但也比 2011 年的比赛多用了 30min 以上。

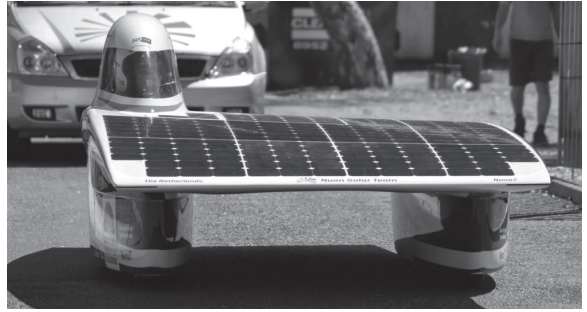
到达凯瑟琳时，挑战者级第一阵营的排名如下：

- ① Team Twente(12:27)
- ② Nuon Solar Team(12:37)
- ③ 斯坦福大学 (12:51)
- ④ 东海大学
- ⑤ 密歇根大学
- ⑥ Team Arrow
- ⑦ 瑞士 Solar Energy Racers
- ⑧ 工学院大学

在凯瑟琳休息 30min 后再次出发。东海大学队超过斯坦福大学队，排名上升到第 3 名。到达第 3 个控制停车点邓马拉（Dunmarra）时，只比 Twente



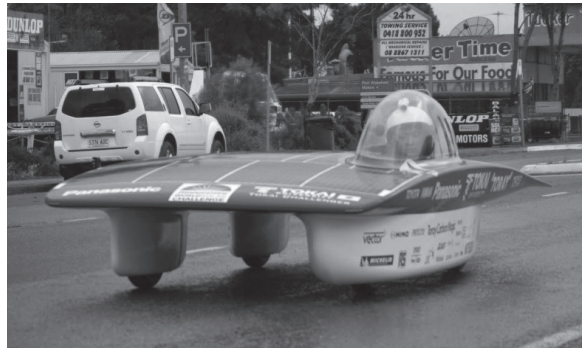
照片 26 在控制停车点充电的“Nuna7”



照片 27 行驶中的“Nuna7”



照片 28 今天在这里宿营（可以一直充电到日落）



照片 29 终点前的雨中行驶

晚了 1min。

### ● 虽然在邓马拉与 Twente 队的差距缩短到了 1min

Twente 队在 16:48 到达邓马拉，东海大学队在 16:49 到达。3min 后的 16:52，有的队已在邓马拉休息了 30min 又出发了。这个队便是荷兰 Nuon Solar Team 队，以较大优势占据了第 1 名的位置（照片 27）。

比赛时间于达尔文时间下午 5 点结束，所以在邓马拉控制停车点还没有结束休息的东海大学队和 Twente 队结束了当天的比赛。

## ■ 比赛第 2 ~ 4 天

### ● 天气晴朗，但与第 1 名的差距仍没有缩小

从第 2 天起，比赛的开始时间是上午 8:00。东海大学队因为前一天在控制停车点没有休息满规定的 30min，所以只能等到 8:19 从邓马拉出发。比东海大学队先到的 Twente 队因为出了点故障，延迟了出发，于是东海大学队上升到第 2 名。

天气晴朗。直到第 4 天，一直是同样的天气（照片 28）。一直行驶排名第 1 的 Nuon 队和东海大学队以 90 ~ 100km/h 的平均速度继续行驶，但东海大学队与 Nuon 队的差距在逐渐拉大。

东海大学队几乎一直处于全速行驶状态。也就是说，考虑到充电量和效率，已经无法再提高速度了，尽管这样也没能缩小差距。

到第 3 天夜晚，为了摆脱这种状况，东海大学队对电机控制器的程序进行了修改，调整了最高速度。第 4 天，两队都是全速行驶，结果差距不但没有缩小，到达最后的控制停车点的时间反而进一步扩大到 30min 以上了。

## ■ 第 5 天：终点

### ● 雨天

Nuon 队和东海大学队都预计在这天到达终点，然而早上就是阴天。上午 8:00 出发后不久，东海大学队行驶的地方就下起了雨（照片 29）。被这块雨云罩住的东海大学队因不能充分发电，只好中途停车，以较弱的光线充电，最后只能以很慢的 30km/h 的速度向前行进，并在达尔文时间 13:22，到达阿德莱德郊外的角谷（Angle Valley）终点，获得第 2 名。

## 比赛复盘

### ● 3个败因

WSC2013年的比赛结果见表2。

以WSC三连冠为目标的东海大学队，输给Nuon队的原因主要有以下三点。

第一，“Tokai Challenger”在预选赛阶段发生漂移，导致预选赛用时增加，最终只取得第20名的成绩。因此，决赛出发顺序靠后，决赛开始阶段为超越排名靠前的选手耗时较多，一开始落后也多。还有，决赛开始后进入单向单车道，造成了超车困难（照片30）。

第二，“Tokai Challenger”的电机设计上，最高速度设定值有些偏低。东海大学太阳能车队预想的赛时巡航速度比去年低，准备的电机的最佳巡航速度为90km/h，通过进角控制可达100km/h的行驶速度（第12届比赛的设计速度更高）。由于比赛规则的改变，赛车从3轮变成4轮，座舱盖加大了，因此把第一阵营的最高速度预想得比上届比赛低一

些。电机的开发也是按速度较低的情况考虑的，这样即使是阴雨天也能高效驱动。可是直到第4天都是晴天，所以没有追上按高速设计的“Nuna7”。在比赛的后半程，对控制程序进行了紧急修改（照片31），电机的速度得以提高，但这未必是电机的最高效率点。另外，在预选赛阶段发生的漂移，使电机的轴承受受到一定损伤，从而不得不用速度较慢的备用电机顶替，这也是一个负面因素。

另外，“Nuna7”安装集光器，是钻了比赛规则的空子。由于增加了太阳光的集光面积，因此发电能力上产生了差别。在上届比赛中，禁止混合使用化合物太阳能电池和硅系太阳能电池。Nuna7准备了面积较小的集光器，为太阳能电池扩大受光面积（照片32）。行驶时集光器放在车内备用，停车时打开用来增强充电能力。集光器的面积约为1.4m<sup>2</sup>，根据ZDP的分析，这个集光器相当于约500W的发电能力。这次比赛从早到晚一直是晴天，集光器一直处于发电效果较好的状态，推测可使发电量增加10%~15%（图3）。2013年比赛的规则设计者都想象不到的空子，却被Nuon Solar团队发现了。

表2 WSC2013年的比赛结果（挑战者级，靠自己的力量完成比赛的车）

序号	队名	国籍	车名	行驶时间 / (h:m)	到达终点时间 / (时间/日/月)	平均速度 / (km/h)
1	Nuon Solar Team	荷兰	Nuna 7	33:03	10:03/10/10	90.71
2	Tokai University	日本	Tokai Challenger	36:22	13:22/10/10	82.43
3	Solar Team Twente	荷兰	The RED Engine	37:38	14:38/10/10	79.67
4	Stanford Solar Car Project	美国	Luminos	39:31	16:31/10/10	75.86
5	Solar Energy Racers	瑞士	SER-2	40:13	08:13/11/10	74.54
6	Punchi Powertrain Solar Car Team	比利时	ndupol One	40:28	08:28/11/10	74.08
7	Team Arrow	澳大利亚	Arrow1	43:38	11:38/11/10	68.71
8	Blue Sky Solar Racing	加拿大	B-7	45:38	13:38/11/10	65.71
9	Univeristy of Michigan	美国	Generation	45:55	13:55/11/10	65.29
10	Onda Solare	意大利	Emilia 3	48:25	16:25/11/10	61.92



照片30 在道路上行驶很难超车的情况  
“Tokai Challenger”正在超越巡航者级车辆



照片31 夜间对电机进行调整的东海大学团队



照片 32 “Nuna7” 的集光器

### ● 真正的败因？

关于集光器，在 2013 年的比赛也许存在有一些争议，但确实是通过了车检的。以 WSC 理念来衡量，有人认为不应该通过车检，笔者也是这样认为的。

另外，像 2013 年“Nuna7”使用的设置在车辆外部、大幅增加受光面积的集光器，在 2015 年的比赛规则中是不允许的。

有不少人认为，如果“Nuna7”没有使用集光器，也许就不能获得第 1 名。但不管怎么说，车速还是比东海大学队快得多。与其说是技术上的差距，倒不如说是战略上的差距。但是，必须把技术作为确立战略方针的依据，这一点是不可改变的。

荷兰 Nuon Solar Team 队在 2009 年和 2011 年连续 2 届比赛都输给了东海大学队，获得第 2 名。为报此兵败之仇，该团队召集了四连冠时的成员，旨在加强“Nuna7”的开发机制。

其结果是，在“Nuna7”上，通过车体下部的凹陷来减小空气阻力、为适应 4 轮布局而新设计的车辆悬架形状等，为达到目标而采取的精益设计随处可见。

与此相比，东海大学队 2013 年的设计是在 2011 年车型基础上做的改动。当然，东海大学队也在改成 4 轮的同时，在提高性能方面下了一定的功夫，但还是偏保守。

不管怎么说，就 2013 年的胜负而言，Nuon Solar Team 夺回冠军宝座的执着信念超出了东海大学队的预想，我想这才是失败的真正原因吧。

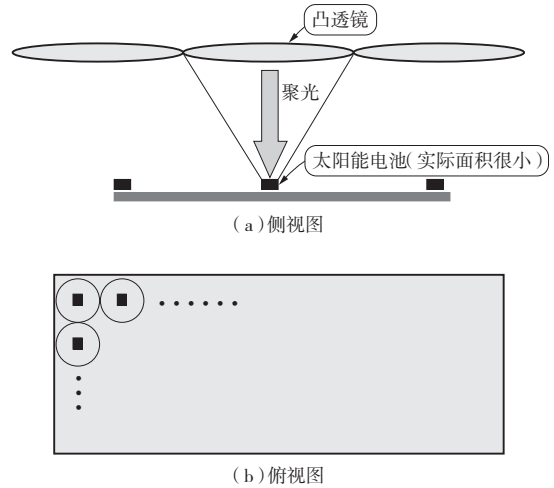


图 3 由于使用了集光器，实际受光面积比太阳能电池板的面积大很多

---

## 对 2015 年 10 月开赛的第 13 届比赛展望

---

获胜难，次次获胜难上加难。不管是东海大学队，还是 Nuon Solar Team 队，或许都这样认为吧。当然，一定还有不少参赛队也以同样强烈的意志瞄着冠军。

WSC 2015 年的比赛于 10 月 18 日 ~ 25 日在澳大利亚举行。我想应该与上届比赛一样会进行网络直播，这样即使在日本也可以实时了解哪个队正在什么地方行驶。在不影响工作和学习的前提下，大家可以抽出一些时间观战比赛也是不错的。

东海大学再次作为挑战者向 Nuon Solar Team 发起挑战，作为日本太阳能车爱好者，期待着再次迎回 WSC 冠军奖杯。

### 笔者介绍

下迫正博

Zero to Darwin Project



学生时代的某个星期天，在名古屋街道散步时偶尔来到太阳能车制作现场，然后加入了 ZDP (Zero to Darwin Project)。看到耐久赛上在炎热的太阳下行驶的太阳能车的电池余量不断增加，深受感动。为了将这样的感动传递到全世界，现正运营 [www.zdp.co.jp](http://www.zdp.co.jp) 网站。