xEV 用功率半导体模块的直接水冷技术

Direct Water Cooling Technology for Power Semiconductor Modules for xEVs

玉井 雄大 TAMAI, Yuta　　小山 贵裕 KOYAMA, Takahiro　　井上 大辅 INOUE, Daisuke

汽车工业正在加速向以电能为动力源的电动汽车（EV）和混合动力汽车（HEV）转换，这些汽车需要小型、薄型且具有高可靠性的功率模块。为满足这一需求，富士电机开发了散热器与水冷套一体化的直接水冷结构，并逐代改善了冷却性能。相对于传统的开放式散热器结构，采用这种结构可抑制冷却器的变形，将散热器的底座厚度薄型化至 20%，不仅实现了散热性能的提高及 2 倍以上的温度循环耐量，还提高了可靠性。

In the automobile industry, the switchover to electricity-powered electric vehicles (EVs) and hybrid electric vehicles (HEVs) has been accelerating. This has increased the demand for smaller, thinner, and more reliable power modules for xEVs. To meet this demand, Fuji Electric has been developing direct water cooling structures that integrate a heat sink and water jacket. The cooling performance of the structures has improved with each successive generation. Compared with conventional open fin structures, the direct water cooling structure can suppress cooling unit deformation. This characteristics allows the heat sink base to be thinned up to 20% to achieve better heat dissipation performance and increase the temperature cycling capability more than twice, improving overall reliability.

1 引言

为实现联合国峰会上通过的可持续发展目标（SDGs：Sustainable Development Goals），作为全球变暖对策，世界各国都被要求削减 CO_2 排放量和节能。汽车产业迎来了以 CASE（Connected（互联汽车）、Autonomous（自动驾驶）、Shared（共享）、Electric（电动化））为关键词的巨大变革期。在电动化领域，向以电能为动力源、靠电机行驶的电动汽车（EV）和混合动力汽车（HEV）的转换正在加速。因为使用电机控制的变频器单元要安装在有限空间内，所以被要求做到小型化、薄型化、轻量化（考虑到低油耗（低耗电量））、提高效率等。为满足这些要求，除电机和变频器外，整合变速箱的新型机电一体化系统的开发也活跃起来。在功率模块方面，也正在推进适用于该新系统的小型化、薄型化、高可靠性产品的开发。

本稿将对采用实现了 xEV 用功率半导体模块的散热器和水冷套一体化的水冷套一体型散热片结构（Integrated fin）的功率模块的高散热化、小型化・薄型化和高可靠性技术，以及进行热流体仿真时重要的流动可视化技术进行介绍。

2 富士电机车载用直接水冷功率模块的趋势和特点

图 1 所示为富士电机车载用直接水冷功率模块的功率密度趋势。迄今为止，富士电机开发了搭载有轻量且易于加工的的铝制冷却器的直接水冷功率模块。第 1 代（2012 年）、第 2 代（2015 年）、第 3 代（2017 年）、第 4 代（2019 年）的功率密度每一代提高约 20%[1]。主要应用技术如下：

（a） 高散热冷却器设计技术[1]-[3]
（b） 高可靠性锡焊技术[1]
（c） 超声波接合技术[2],[3]

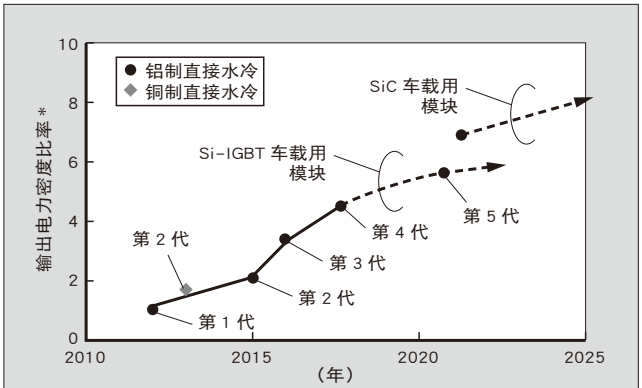

图 1　车载用直接水冷功率模块的功率密度趋势

（d） 175℃连续工作保证技术[2],[3]
（e） 将半导体元件（芯片）IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）与 FWD（Free Wheeling Diode）进行单芯片化的 RC-IGBT（Reverse-Conducting IGBT）[4]
（f） 引线框架配线技术[5]

上述 (a) 高散热冷却器设计技术开发了**图 2** 所示的水冷套一体型散热片结构，从第 2 代开始采用，提高了冷却器的冷却性能（散热性）。与未一体化的开放式散热片结构（Open fin）相比，该结构可抑制冷却器的变形，使散热器的基础厚度（散热片基础厚度）薄型化至 20%，不仅提高了冷却性能，还具有 2 倍以上的温度循环耐量。

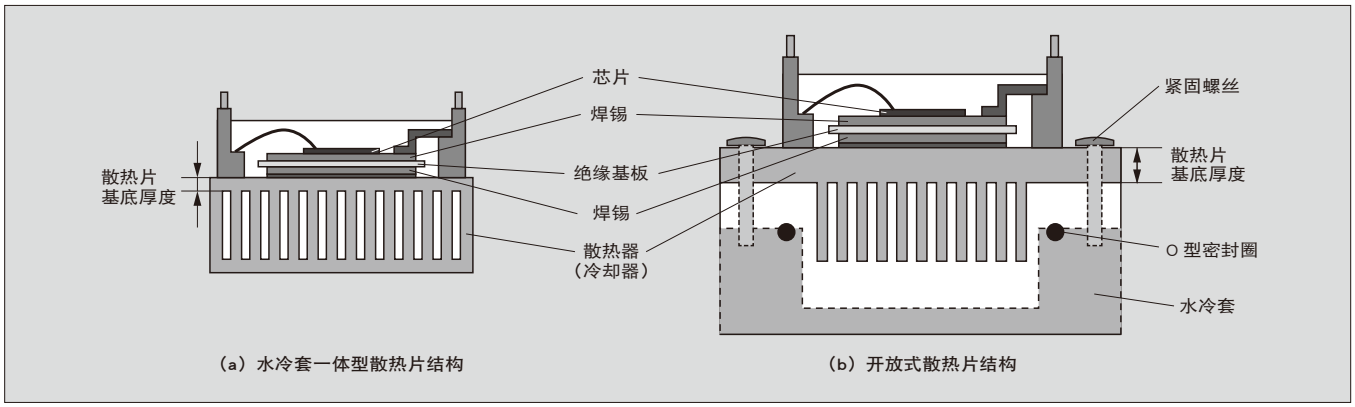

图 2　水冷套一体型散热片结构及开放式散热片结构的截面图

3　基于水冷套一体型结构散热片的高散热化

3.1　高散热化的课题

为提高功率模块的散热性，增加流经冷却器散热片表面的制冷剂流速即可。但是，如**图 3** 所示，表示散热性特性的热阻和冷却器的压力损耗呈权衡关系，增加流速则压力损耗增大，使循环泵的负荷增加。因此，重新审视了各代散热片的形状，改善了这种权衡关系，提高了散热性[6]。通过调节散热片高度的方法，可控制压力损耗的增大。但是，从**图 4** 冷却器的截面图可知，如果增加散热片高度，冷却器的体积也会增加。因此，为进行高功率密度化，需要在顾客容许的压力损耗和体积范围内，同时兼顾高散热化和高可靠性化。

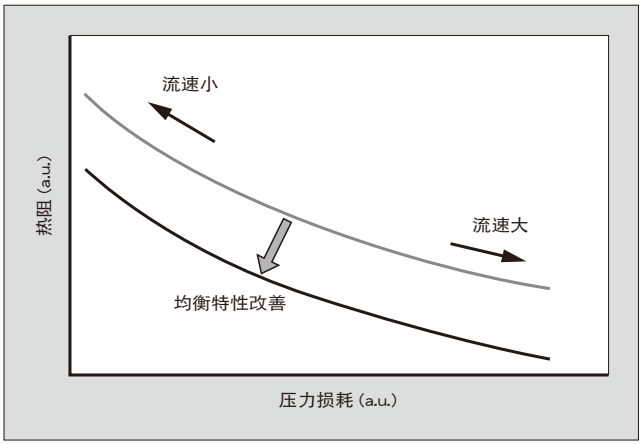

图 3　热阻与压力损耗的关系

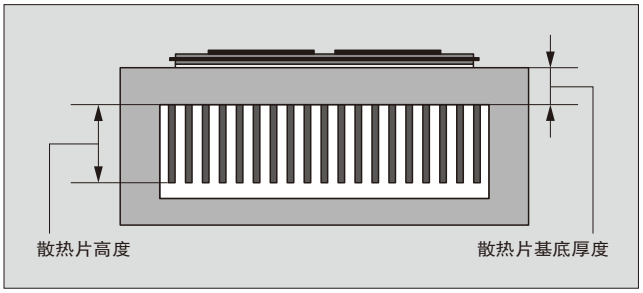

图 4　冷却器的截面图

3.2　散热性的提高

将第 1 代直接水冷功率模块的热阻按成分分解后进行研究的结果如**图 5** 所示。冷却器散热片基底的热阻占整体的 36%，阻碍了散热性能。如果采用将散热片基底的厚度减薄至 20% 的结构，则可改善模块的热阻。但是，为了抑制模块的热变形，还需要确保冷却器的刚性。迄今为止，都是通过维持散热片基底厚度的方式，以确保刚性。

因此，为了兼顾改善热阻和抑制热变形，开发了将散热

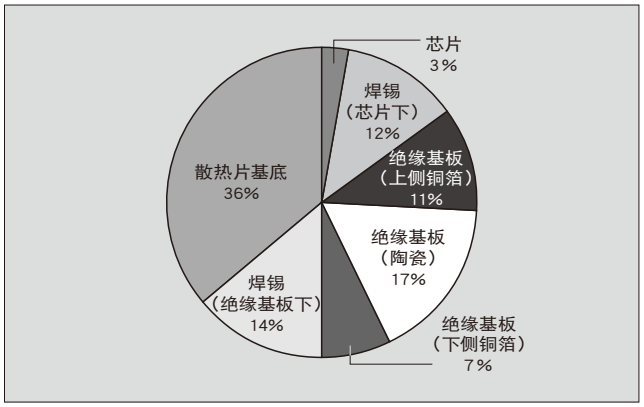

图 5　第 1 代直接水冷结构的热阻比

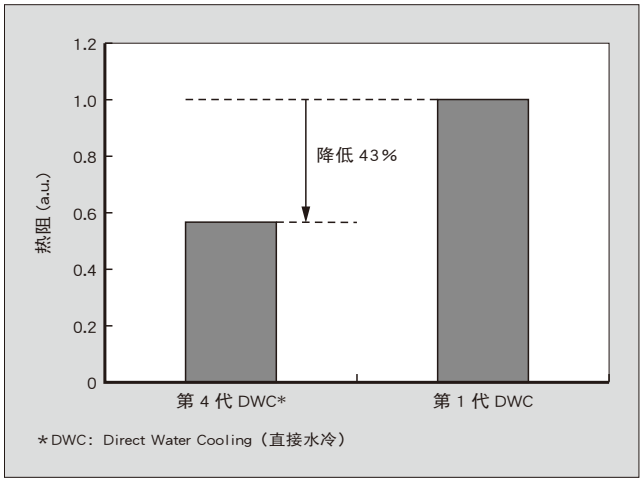

图 6　第 1 代及第 4 代直接水冷功率模块的热阻比较

器和水冷套一体化的水冷套一体型散热片结构。**图 6** 所示为开放式散热片结构第 1 代直接水冷（DWC: Direct Water Cooling）功率模块与采用水冷套一体型散热片结构的第 4 代直接水冷功率模块的热阻比较结果。第 4 代直接水冷功率模块通过将水冷套进行一体化，提高了整个冷却器的刚性，与开放式散热片相比，散热片基底厚度更薄。此外，通过优化散热片形状和减薄焊锡厚度等降低热阻的措施，与第 1 代相比热阻降低了 43%。

4 基于水冷套一体型散热片结构的高可靠性化

4.1 降低冷却器热应力引起的翘曲

除了高散热性能外，功率模块还需要具有高可靠性。利用开放式散热片结构及水冷套一体型散热片结构的要素模型，通过热应力仿真（**图 7**）求得的冷却器翘曲与散热片基底厚度的依赖关系如**图 8** 所示。

从冷却器的密封性和在变频器上的搭载便利性来看，冷却器的翘曲越小越好，约 150 μm 以下为目标进行设计。如**图 8** 所示，水冷套一体型散热片结构通过采用高刚性结构，可将翘曲控制在 150 μm 以下。

4.2 提高温度循环耐量

在温度循环中，冷却器和绝缘基板的热膨胀系数之差导致焊锡接合部反复发生变形，焊锡上发生裂纹，造成热阻恶化，最终导致功率模块发生故障。截至故障发生时的温度循环作为温度循环耐量，如**图 9** 所示。水冷套一体型散热片结构的温度循环耐量受散热片基底厚度的影响小。与此相对，开放式散热片结构在很大程度上取决于散热片基底的厚度。开放式散热片结构中，散热片基底薄时（0.2arb. unit），冷却器随着绝缘基板的热变形而发生相应变形，焊锡处产生的变形变小，温度循环耐量变高，但如上所述，翘曲变大不适合实际运用。在**图 9** 中，比较冷却器翘曲约为 150 μm 的第 1 代和第 4 代要素模型的温度循环耐量，水冷套一体型散热片结构（散热片基底厚度 0.2a.u.）的温度循环耐量为开放式散热片结构（散热片基底厚度 1.0a.u.）的 2 倍以上。

从以上结果可知，水冷套一体型散热片结构不仅有助于散热片基底的薄型化，也能提高可靠性。与第 1 代相比，第 4 代直接水冷模块可将散热片基底厚度减少至 20%，冷却器整体高度也可减至 1/2（减少 50%）。

4.3 提高功率模块的可靠性

第 1 代及第 4 代直接水冷功率模块的温度循环耐量的评价结果如**图 10** 所示。第 4 代直接水冷模块通过采用水冷

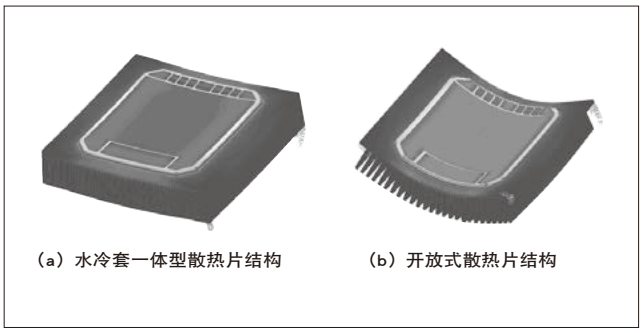

图 7 水冷套一体型散热片及开放式散热片结构的要素模型的热应力仿真

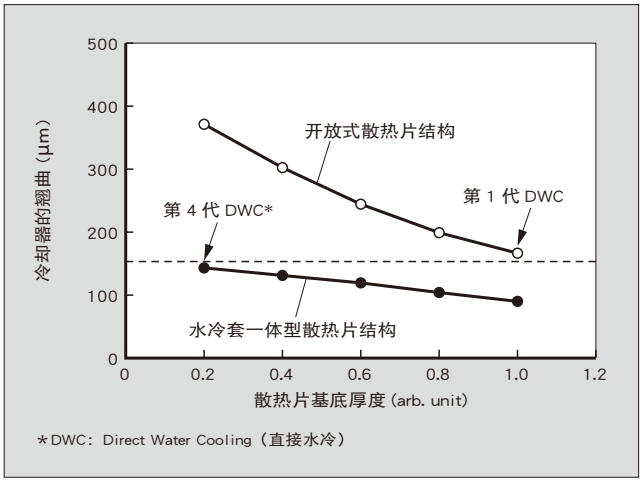

图 8 基于要素模型的冷却器翘曲与散热片基底厚度的依赖关系

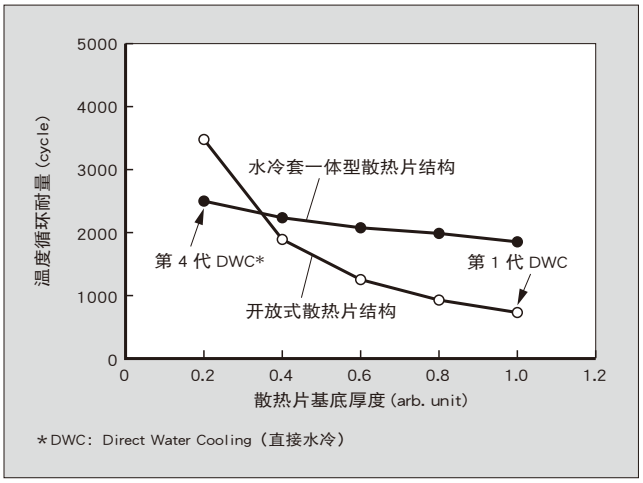

图 9 基于要素模型的温度循环耐量与散热片基底厚度的依赖关系

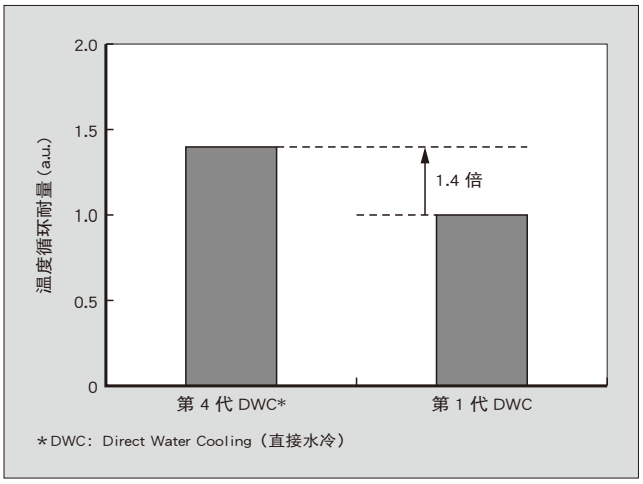

图 10 功率模块的温度循环耐量

套一体型散热片结构，获得了 1.4 倍的温度循环耐量。此外，提高焊锡材料的强度，可作为提高功率模块的温度循环耐量的措施之一[7]。富士电机优化了 Sb 含量，开发了高强度 Sn-Sb 焊锡[8],[9]。通过在第 4 代直接水冷功率模块中使用高强度焊锡，今后可进一步提高模块的可靠性。

温度循环评价后的功率模块的锡焊接合部破坏形态如**图 11** 所示。该破坏形态与第 1 代一样，裂纹在基板和锡焊界面上发展。因该裂纹发展引起的热阻恶化决定着产品的温度循环耐量，因此根据焊锡材料的疲劳寿命曲线进行了可靠性设计。

5 冷却器设计的可视化技术

设计冷却器时，热流体仿真的分析精度和实际流动可视化非常重要。**图 12** 所示为基于热流体仿真的冷却器流道内流速分布计算结果。为了验证通过热流体仿真求出的冷却器流道内流速分布能否按照预期再现，让粒子分散于制冷剂中并流入透明的冷却器，通过粒子图像测速法（PIV: Particle Image Velocimetry）对制冷剂的流速分布进行了可视化[10],[11]。**图 13** 所示为冷却器流道内粒子运动的测量结果。根据该测量结果，如**图 14** 所示，求出了冷却器流道内的流速分布。结果，确认了在波纹形散热片的折射单元变快，再现了预期的流动，与**图 12** 的热流体仿真相一致。结合热流体仿真和可视化技术，为再现实际流动，优化了仿真模型的网格尺寸等。由此，可得到热阻误差在 5% 以下的分析精度，使冷却性能的提高和极限设计成为可能。

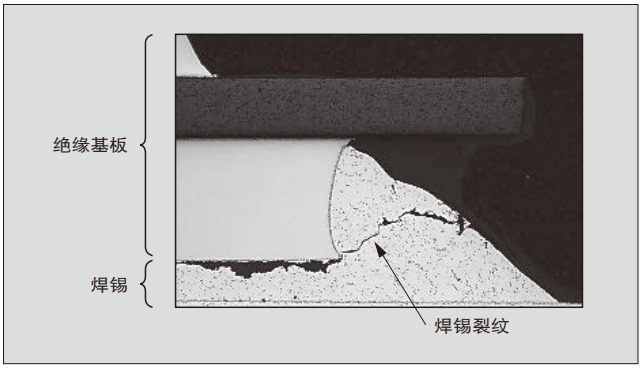

图 11　温度循环试验后的绝缘基板下锡焊接合部破坏形态

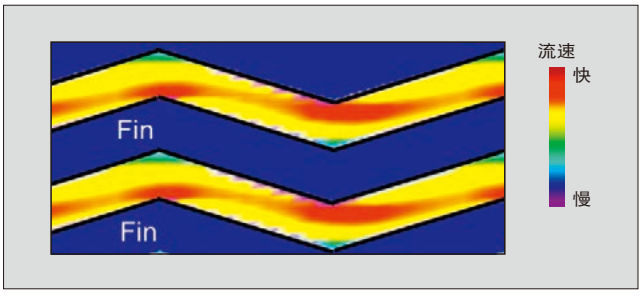

图 12　基于热流体仿真的冷却器流道内流速分布的计算结果

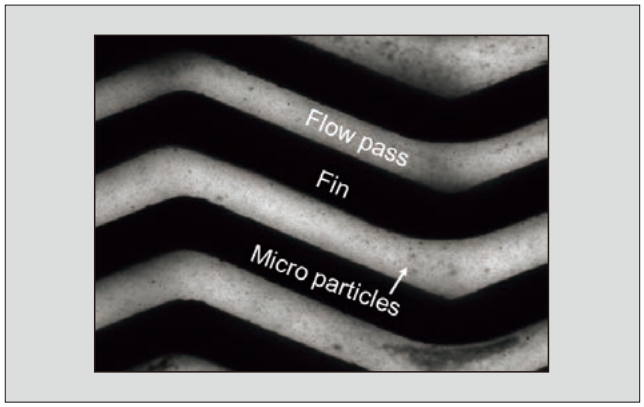

图 13　基于 PIV 的冷却器流道内粒子流动的测定

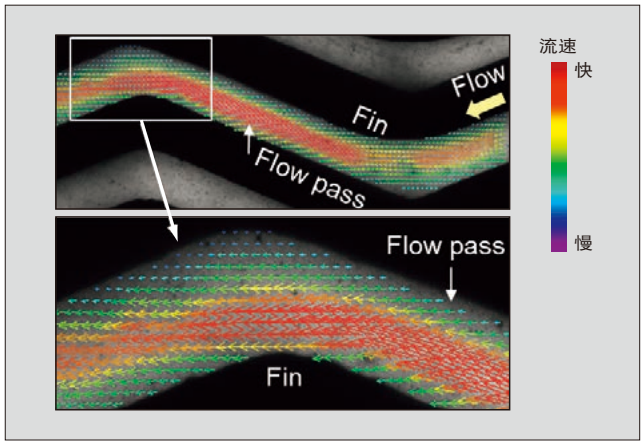

图 14　冷却器流道内流速分布的评价结果

6 后记

本稿对 xEV 用功率半导体模块的直接水冷技术进行了介绍。

今后，富士电机仍将以这些技术为基础推进持续的技术开发，及时提供满足顾客要求的产品，努力减少 CO_2 排放量，采取节能化举措，为应对全球气候变暖做出应有的贡献。

参考文献

(1) 郷原広道ほか. ハイブリッド車用 IPM のパッケージ技術. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.258-262.
(2) 乡原广道等. 混合动力车用第 2 代铝制直接水冷封装技术. 富士电机技报. 2015, vol.C7, no.1, p.20-24.
(3) 乡原广道等. 车载用第 3 代功率模块的封装技术. 富士电机技术期刊. 2016, vol.C8, no.1, p.34-37.
(4) 佐藤宪一郎等. 搭载 RC-IGBT 的车载用第 3 代直接水冷型功率模块的高功能化. 富士电机技术期刊. 2017, vol.C9, no.1, p.37-40.
(5) 井上大辅等. xEV 用第 4 代铝制直接水冷封装技术. 富士电机技术期刊. 2020, vol.C12, no.1, p.29-33.
(6) Gohara, H. et al. “Next-gen IGBT module structure for hybrid vehicle with high cooling performance and high temperature operation”. Proceedings of PCIM

Europe 2014, 1187-1194.
⑺ Saito, T. et al. “Investigation of New Joint Technology for High Temperature Operation and High Reliability of Power Module”. Proceedings of the 20th Symposium on Microjoining and Assembly Technology in Electronics. Yokohama, 2014.
⑻ Nishiura, A. et al. “Improved life of IGBT module suitable for electric propulsion system”. Proceedings of the 24th EVS, Stavanger, 2009.
⑼ Saito, T. et al. “New assembly technologies for Tjmax=175 ° C continuous operation guaranty of IGBT module”. Proceedings of PCIM Europe 2013, 455-461.
⑽ McKenna, S.P. ; McGlillis, W.R. “Performance of digital image velocimetry processing techniques”. Exp. Fluids, 32 (2002) , 106-115.
⑾ The Visualization Society of Japan. “PIV Handbook”. print 2002.

玉井　雄大
从事车载用 IGBT 模块的封装技术开发和设计。现就职于富士电机株式会社电子元件事业本部开发统括部封装开发部。电子工业实装学会会员。

小山　贵裕
从事车载用 IGBT 模块的封装技术开发和设计。现就职于富士电机株式会社电子元件事业本部开发统括部封装开发部。

井上　大辅
从事车载用 IGBT 模块的封装结构开发和设计。现就职于富士电机株式会社电子元件事业本部开发统括部封装开发部。

富士电机

Fuji Electric

＊本刊记载的公司名称及产品，有可能是各相关公司的商标或注册商标。