

3. 功能改善

JSCAST Ver.17 强化完善了以下解析或显示功能。

通用功能（适用于各种铸造工艺）

- 1) 高速凝固解析模块
- 2) 充填不良预测功能（新增加了达西流动模型）
- 3) 热物性值计算专用 JMatPro 镶嵌模块
- 4) 重力方向设定方法的完善（新增加了矢量设定）
- 5) 内浇道流入区别显示与内浇道流量变化曲线显示颜色的统一

压铸专用功能

- 6) 破断急冷层的发生及卷入预测功能（可考虑大片薄片）
- 7) 循环铸造功能
- 8) P-Q2 线图功能

重力铸造专用功能

- 9) 砂型铸造考虑背压时的流动解析

3-1 高速凝固解析模块（高速模块）

1) 概要

普通模块使用中央处理器(CPU)执行流动、凝固及变形解析，而高速模块则使用显卡（GPU）执行流动及凝固的高速计算（变形解析的高速模块正在开发中）。与普通模块（CPU 计算）相比，高速模块的计算速度提高了 4~17 倍（比较条件：本公司选定的计算模型及电脑配置）。流动解析的高速模块已在 Ver.16 中发布，凝固解析的高速模块将在本年度最新版本 Ver.17 中发布。基本模块及可选模块功能的高速模块兼容现状如表 3.1.1 所示。

表 3.1.1 高速模块的对应表 Y: 对应、N: 未对应 (CPU 计算)、n/a: 无此选项

对象功能	流动解析 (Ver.16)	凝固解析 (Ver.17)	变形解析
1.标准模块（标准功能）	Y	Y	n/a
2.可选模块	n/a	n/a	n/a
① 冒口解析	n/a	Y	n/a
② 倾斜铸造[流动]	Y	n/a	n/a
③ 循环铸造[凝固]	n/a	Y	n/a
④ 混合网格[流动&凝固]	Y	Y	n/a
⑤ 考虑背压（金属型与砂型铸造）	Y	Y	n/a
⑥ 缩孔缩松（FCD, 应力法）[凝固]	n/a	N	n/a
⑦ 缩孔缩松[流动&凝固]	N	N	n/a
⑧ 铸造变形	n/a	n/a	n/a
⑨ 热变形接口	n/a	n/a	n/a
⑩ 考虑压铸料筒[流动]	Y	n/a	n/a
⑪ 考虑表面张力[流动]	Y	n/a	n/a
⑫ 夹杂, 夹砂[流动]	N	n/a	n/a
⑬ 热物理参数计算模块	n/a	n/a	n/a
⑭ 消失模铸造[流动&凝固]	Y	Y	n/a

2) 输入数据

无变更。

3) 输出数据

无变更。

4) 适用网格

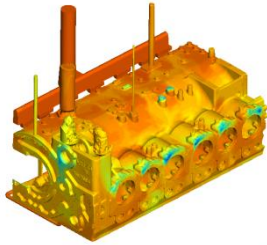
表 1.1.1 中，标准模块及各项可选模块功能的高速模块与普通模块，其适用网格形状相同。

5) 计算案例

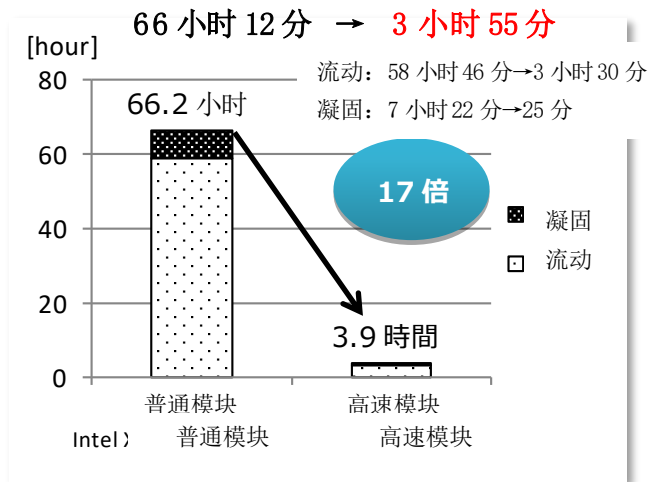
① 重力铸造模型

计算中使用的功能选项

- 基本模块 (流动·凝固)
- 混合网格
- 表面张力
- 考虑过滤器



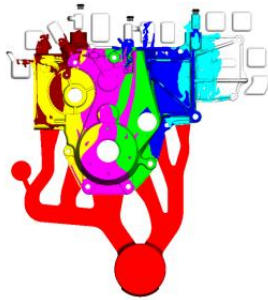
网格总数: 140,053,104
 铸件网格数: 10,976,724
 充型时间: 9.8 秒
 铸件尺寸: 1310×873×882
 铸件重量: 580 kg
 显卡内存用量: 19 GB



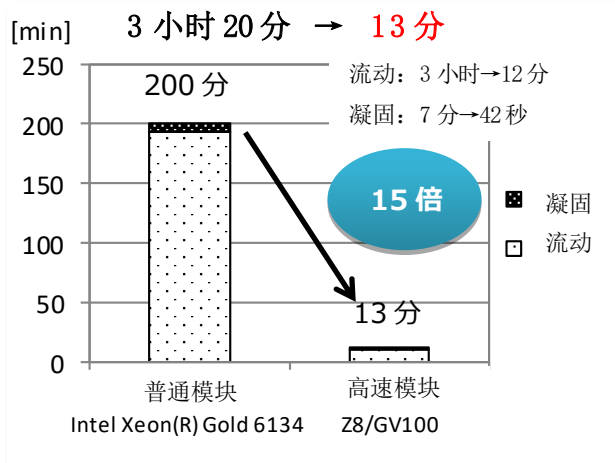
② 铝合金压铸模型

计算中使用的功能选项

- 基本模块 (流动·凝固)



网格总数: 60,023,712
 铸件网格数: 1,515,172
 充型时间: 0.4 秒
 铸件尺寸: 430×320×180
 铸件重量: 8 kg
 显卡内存用量: 7 GB



6) 高速模块的电脑配置要求

高速模块的运行环境如下。有关 CPU、内存等其他项目，请参照本说明书的“2-1 电脑配置要求”。

OS: Windows10 Pro 64 位版

显卡: NVIDIA Quadro 系列 (参照下述“已通过测试的硬件”)

NVIDIA 显卡驱动程序: 版本 398.26 以上

已通过测试的硬件

- **PC WorkStation**

HP Z440, Z840, Z4 G4, Z8 G4, Zbook17 G4, G5, G6

- **显卡**

NVIDIA QUADRO P2000, P4000, P5000, P6000, GP100, GV100, RTX4000, RTX5000, RTX6000,
RTX8000

7) 注意事项

- ①由于高速模块大量采用了并行处理技术，即使是同一个计算模型，其每次的计算结果（温度分布、充填状态等）也会出现差异。目前正在开发可抑制计算差异的新版本，预计近期会发布改良后的新版本。
- ②如果网格数过多，计算该模型所需内存超过了显卡内存，则不能使用 GPU（高速模块）计算。此时，请使用 CPU（普通模块）计算。

3-2 充填不良预测功能的强化 (追加了达西流动模型) (标准模块功能)

1) 概要

版本 16 中的充型流动求解器, 在使用传统的流动停止机理 (金属液前沿堵塞导致流动停止) 的基础上, 增加了新的流动停止机理 (内部流道堵塞导致流动停止), 使流动停止的预测能力显著提高。但有关凝固形态, 版本 16 仅考虑了等轴晶凝固和胞状晶凝固, 未考虑树枝晶凝固, 因此对凝固形态的考虑不充分。为此, 在 Ver.17 中, 在柱状树枝晶凝固时, 增加了达西流动模型, 即通过考虑固相网路间的残留液相流动, 模拟凝固形态对流动长度的影响, 以便进一步提高充填不良缺陷的预测精度。

2) 透过率推算公式

计算达西流动区域的流动阻力时, 透过率数据的精度至关重要。在国内外已发表的研究论文中有许多推荐公式, 经仔细筛选, JSCAST Ver.17 采纳了以下 4 种推算公式供用户选择。

a) Carman-Kozeny 公式^{6a)}

$$K = \frac{d_2^2 (1-f_s)^3}{180 f_s^2} = \frac{d_2^2 f_L^3}{180 (1-f_L)^2} \quad (1)$$

符号说明: K : 透过率 [m^2], f_s : 固相率, f_L : 液相率, d_2 : 2 次枝晶间距 [m] (树枝晶凝固时), 或晶粒的平均尺寸 (非树枝晶凝固时、例如共晶凝固)。

b) 大中公式^{6b)}

$$K = 1.5 \times 10^{-10} (1-f_s)^3 \quad [\text{m}^2] \quad (2)$$

c) S.M.H.M 公式^{6c)}

$$K = (1-f_s) \times 10^{\left(7.175 f_s + 5.185 + 0.0002 \times \frac{dQ}{dt}\right)} \quad [\text{m}^2] \quad (3)$$

符号说明: dQ/dt : 固相率为 f_s 时的散热速度 [J/s]。

d) Poirier 公式^{6d)}

$$K_x = K_y = \begin{cases} 1.09 \times 10^{-3} f_L^{3.32} d_1^2 & f_L < 0.65 \\ 4.04 \times 10^{-6} \left[\frac{f_L}{1-f_L} \right]^{6.7336} d_1^2 & 0.65 \leq f_L < 0.75 \\ \left(-6.49 \times 10^{-2} + 5.43 \times 10^{-2} \left[\frac{f_L}{1-f_L} \right]^{0.25} \right) d_1^2 & f_L \geq 0.75 \end{cases} \quad (4)$$

符号说明: d_1 : 1 次枝晶间距 [m], K_x, K_y : 与枝晶主轴 (1 次轴) 垂直方向流动时的透过率 [m^2], Z : 枝晶主轴的生长方向。例如, 当枝晶主轴的生长方向为铸型壁面的垂直反方向, 推算与铸型壁面平行方向的透过率时, 即可使用上述公式(4)。

图 3.2.1 比较了不同推算公式所得的渗透率随固相率的变化曲线。通过比较可以看出, Poirier 公式所得的推算值最低, 而 SMHM 公式所得的推算值最高。另外在 $f_s \geq 0.6$ 的范围内, Carman-Kozeny 公式与大中公式的推算值较接近, 但在固相率较低时, 两者相差约 1 个数量级。

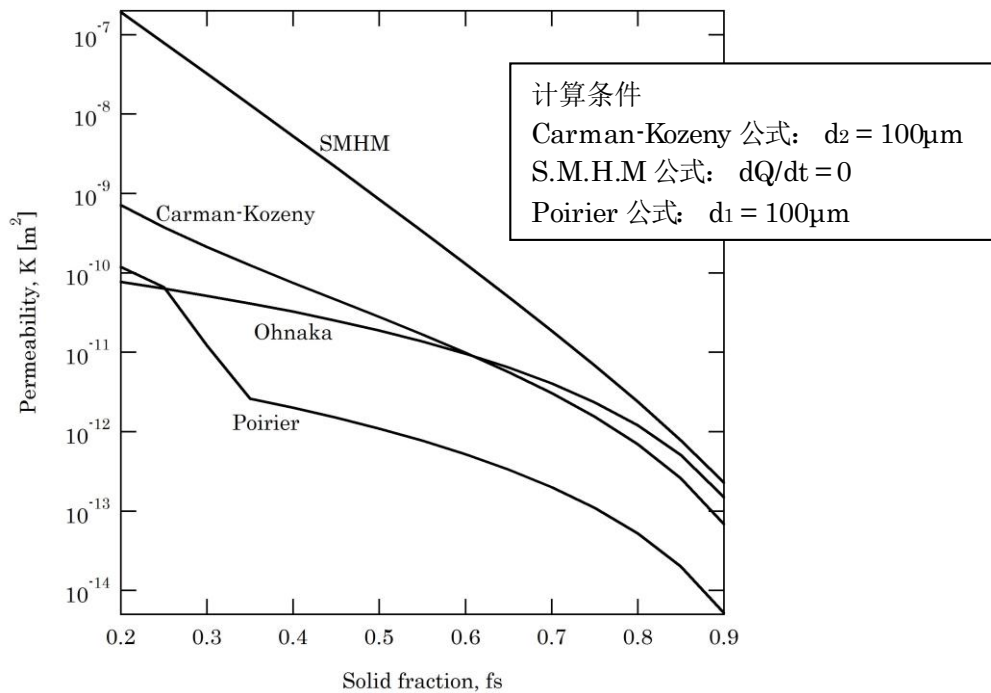


图 3.2.1 透过率变化曲线（随固相率的变化关系）

3) 输入数据

充填不良缺陷预测用的计算条件如表 3.2.1 所示。铸造合金的凝固形态及与凝固温度区间 (ΔT) 大小的对应关系在 JSCAST 中分为三大类，凝固形态不同，需要输入的数据将稍有变化。详细信息，请参考表 3.2.2。

4) 输出数据

无变更。

5) 适用网格形状

垂直网格及混合网格。

表 3.2.1 充填不良预测所需要的设定条件

设定项目	说明
液面及内部流道的临界阻塞率	<p>设定流动停止时，液面（流动前沿）或内部流道的任意截面位置的网格中，固相率达到「流动停止临界固相率」的比率。</p> <p>例如：此设定值为 0.9 时，若流动液面网格中，有 90% 以上的网格其固相率达到或超过「流动停止临界固相率」时，充型流动将停止。</p>
凝固形态及凝固温度区间 (ΔT)	<p>设定凝固形态。有以下 3 个可选项。</p> <p>糊状等轴晶凝固：固相从液体中不断形核并保持近球状生长。凝固温度区间越宽，固液界面前的液体温度梯度越小，就越容易形成这种凝固形态。</p> <p>柱状树枝晶凝固：固相在型壁形核，在随后的生长过程中，以柱状晶形态向铸件厚度中心优先生长。凝固温度区间较窄的铸造合金易于形成这种凝固形态。</p> <p>胞状或平界面凝固：固相在型壁形核，在随后的生长过程中，固液界面呈胞状或平面状（非枝晶）向铸件厚度中心生长。纯金属，共晶合金或稀合金（其凝固温度区间为零或接近零）易于形成这种凝固形态。</p>
流动停止临界固相率 (fsc)	<p>设定流动停止时的临界固相率 fsc。</p> <p>但请注意，固相率大于此处指定的 fsc 的区域是否停止流动，还取决于以下</p>

	设定内容。
铸型表面附着固相的处理	<p>设定铸型表面附着固相的处理方法。有以下 2 个可选项。</p> <p>流动: 附着在铸型表面上的固相将继续流动</p> <p>停止流动: 附着在铸型表面上的固相将停止流动</p> <p>铸型表面附着固相定义: 固相率为「流动停止临界固相率」以上, 且与铸型表面相连。</p>
达西流动区域定义 ($fsc1 < fs < fsc2$)	<p>设定达西流动区域的固相率范围 ($fsc1 \sim fsc2$)。</p> <p>fsc1: 达西流动区域的固相率下限。当固相率超过 $fsc1$ 时, 形成固相网络, 固相流动停止, 固相网路间隙中的残留液相可继续流动。</p> <p>fsc2: 达西流动区域的固相率上限。当固相率超过 $fsc2$ 时, 残留液相也将停止流动。</p>
透过率推算公式	<p>设定透过率的推算公式, 有以下 4 个可选项。</p> <p>Carman-Kozeny 公式: 最常用的推算公式</p> <p>大中公式: 简易推算公式, 不需要输入枝晶间距</p> <p>S.M.H.M 公式: 推算公式中使用的是凝固过程中的冷却速度。与使用枝晶间距的推算公式相比, 更直接, 方便, 通用。</p> <p>Poirier 公式: 考虑流动方向对透过率的影响。适用于柱状晶凝固, 但不适用于等轴晶凝固。</p>

表 3.2.2 凝固形态与必要设定数据间的对应关系

设定项目	必要设定数据
糊状等轴晶凝固	液面及内部流道的临界阻塞率, 流动停止临界固相率 铸型表面附着固相的处理
柱状树枝晶凝固	液面及内部流道的临界阻塞率 达西流动区域的固相率范围 ($fsc1 \sim fsc2$) 透过率的推算公式
胞状或平面凝固	液面及内部流道的临界阻塞率, 流动停止临界固相率 铸型表面附着固相的处理 (固定为「流动停止」, 不能更改)

6) 计算结果示例

流动停止的预测结果示例如图 3.2.2 所示。为比较凝固形态对流动长度的影响，图中的计算条件分别为：

(a) 糊状等轴晶凝固 (b) 胞状或平界面凝固 (c) 柱状树枝晶凝固。另外，图中的显示结果为 3 种计算条件下，流动停止发生时铸件内部的固相率分布。通过仔细观察及对比 3 种计算结果，不难得出以下结论。

- (a) 附着于铸壁表面上的固相仍继续流动，金属液前沿与铸型接触时间最长，因此其温度最低，凝固率最高，最终因金属液前沿固相堵塞而导致停止流动。
- (b) 附着于铸壁表面上的固相停止流动，因此在铸件厚度中心附近形成流动通道（隧道）。高温金属液通过狭窄的隧道流至前沿，使前沿的温度升高，凝固延迟。最终，流动停止的原因不是前沿堵塞，而是前沿后方的流动通道。以上原因，导致流动停止时(b)的流动长度大于(a)。
- (c) 达西流动区域内的残留液相继续流动，因此传输到前沿的高温液体要多于(b)，导致流动停止时(c)的流动长度大于(b)。

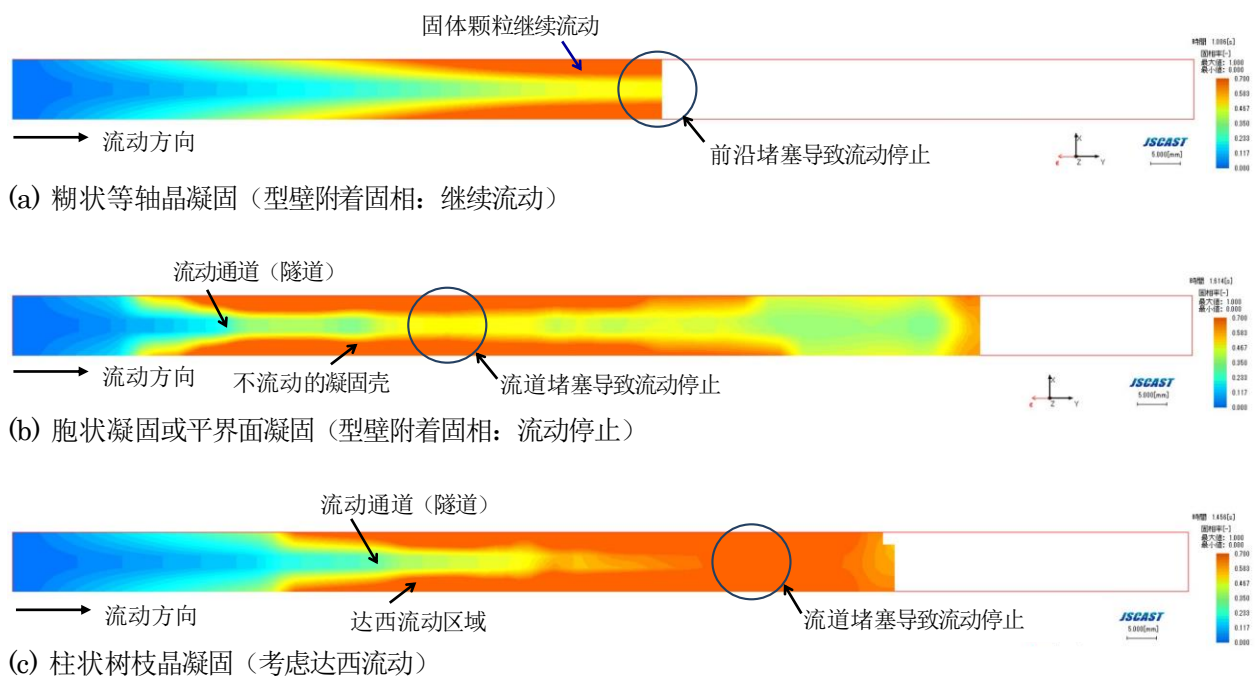


图 3.2.2 计算结果示例：流动停止时的流动长度及固相率分布

7) 参考文献

- (a) T.Campanella, C.Charbon, M.Rappaz: Scripta Materialia, Vol49 (2003) pp1029–1034, "Influence of permeability on the grain refinement induced by forced convection in copper-base alloys".
- (b) 大中逸雄, 松本雅充: “铸锭宏观偏析的计算机模拟”, 鉄と鋼, (1987, No.14), pp1698-1705
- (c) S.M.H.Mirbagheri, etc.: Computer Fluid Dynamics Technologies and Applications (2011), pp333-358, “Simulation of Liquid Flow Permeability for Dendritic Structures during Solidification Process”.
- (d) H.W. Huang and D.R.Poirier: “Computer Simulation of Directional Solidification of Binary Alloy Calculated under Personal Computer Platform”, Tamkang J of Sci and Eng., Vol12, No. 3, pp. 239-248 (2009)

3-3 计算热物理参数的 JMatPro 镶嵌模块 (热物理参数计算可选模块)

1) 变更点

对「热物性值计算用的 JMatPro 镶嵌模块」及「JMatPro 计算结果的导入界面」进行了以下改进。

(a) 本可选模块功能中采用的 JMatPro 版本升级为 JMatPro-Ver.10, 合金数据库中新增加了铜合金。

(参见图 3.3.1)

(b) 随温度变化而变化的热物性值数据导入点数的最大值由旧版本的 20 增加至 100。因而增加了固相线温度以下温度范围内的热物性值数据的可采集点数 (例如, 铁系合金的固态相变时的等效比热, 参见图 3.3.2)。

(c) 图 3.2.1 的左下方为随温度变化而变化的热物理参数的列表显示。如果需要确认表中某数据在变化曲线上的位置, 单击该数据左侧的勾选框, 变化曲线上将用标识显示该勾选单数据。

(d) 可以将变化曲线图在另外开启的窗口中放大显示, 从而更容易确认数据 (参见图 3.3.4)。

2) 可对应的铸造合金系

改善后的 JMatPro 镶嵌模块可计算以下 13 种铸造合金系的热物理参数。

- (01) 铝合金
- (02) 镁合金
- (03) 铸铁
- (04) 普通铸钢
- (05) 不锈钢
- (06) Ni 基耐热合金
- (07) NiFe 基超耐热合金
- (08) Ni 基单晶合金
- (09) 钛合金
- (10) 焊料合金
- (11) 锆合金
- (12) 钴合金
- (13) 铜合金

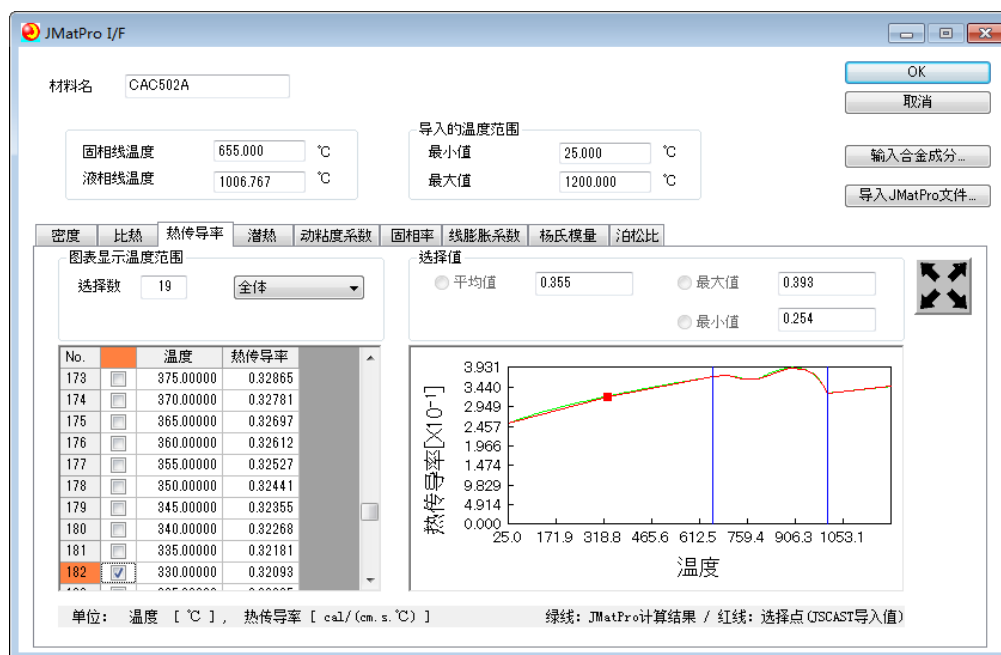


图 3.3.1 铜合金热物理参数的计算结果

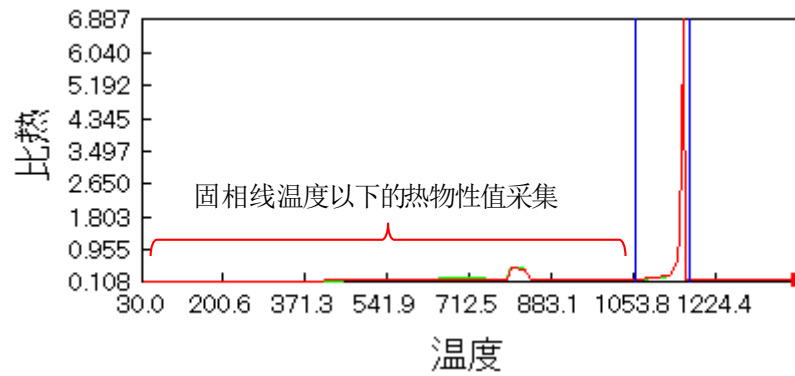


图 3.3.2 固相线温度下方的比热数据采集

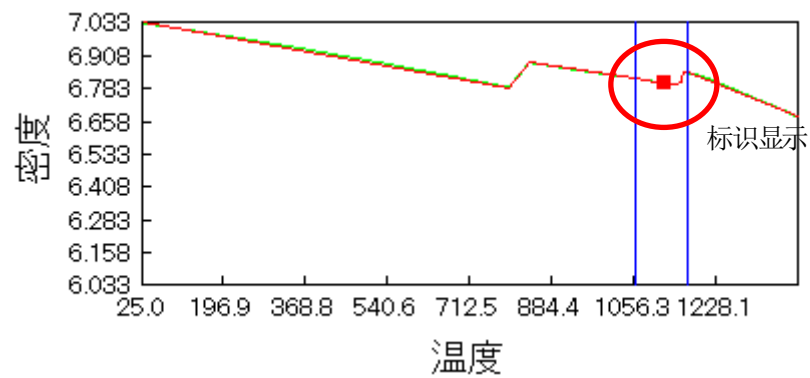


图 3.3.3 变化曲线上的标识显示

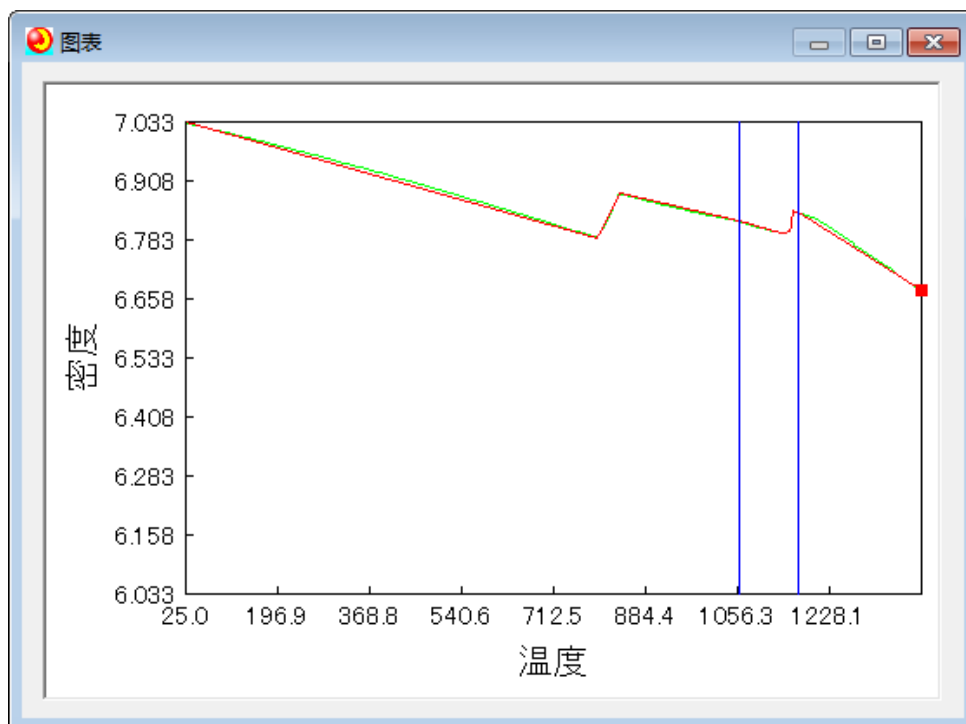


图 3.3.4 在新开启的窗口内变化曲线的局部放大显示

3-4 重力方向的设定方法 (矢量设定) (标准模块功能)

1) 概要

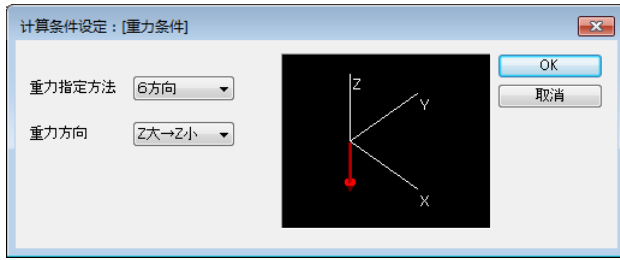
截至版本 16 的 JSCAST 软件, 只能通过使用“6 方向”(即坐标轴方向)或“任意角度”设置重力方向, 但是某些角度的重力方向, 使用“任意角度”或“6 方向”均无法定义。为解决此问题, Ver.17 增加了重力方向的“矢量定义”, 以使用户设定所有角度的重力方向。

2) 输入数据

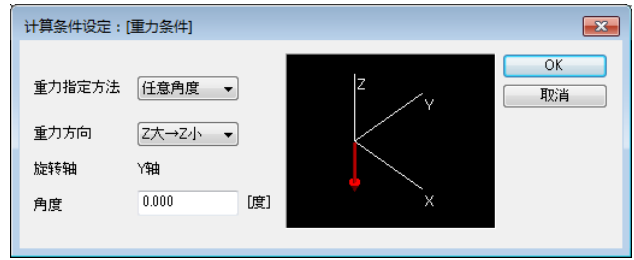
重力方向相关的设定选项如表 3.4.1 所示。

表 3.4.1 重力方向设定的相关说明

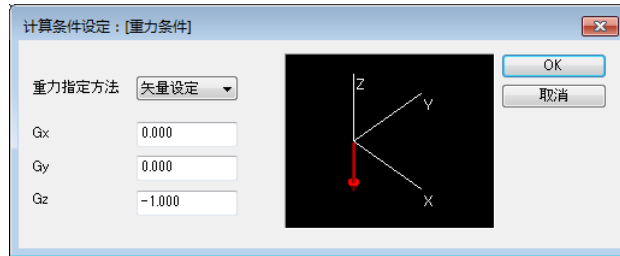
设定项目	说明
重力方向设定	<p>6 方向: 重力方向与坐标轴平时使用此选项。</p> <p>注: 6 方向是指 (X, Y, Z) 各坐标轴正负方向的总和。</p> <p>任意角度: 重力方向与坐标轴呈任意角度时使用此选项。</p> <p>矢量设定: 直接设定重力方向的矢量分量。</p> <p>限定事项: 以下计算选项时, 重力设定方法仅限坐标轴方向。</p> <p>(1) 倾斜铸造</p> <p>(2) 压铸料筒</p> <p>(3) 消失模铸造</p> <p>(4) 凝固解析的所有模块</p>
重力方向	<p>重力方向设定为「6 方向」时:</p> <p>从「无, Z 大→Z 小, Z 小→Z 大, Y 大→Y 小, Y 小→Y 大, X 大→X 小, X 小→X 大」中选择。</p> <p>重力方向设定为「任意角度」时:</p> <p>从「Z 大→Z 小, Y 大→Y 小, X 大→X 小」中选择, 并输入角度。</p>
旋转轴	重力方向设定为「任意角度」时, 根据重力方向自动确定旋转轴。
角度	<p>重力方向设定为「任意角度」时, 以上述「重力方向」的设定为基准, 设定重力方向自基准方向的旋转角度。旋转正方向遵循右手准则, 即右手大拇指指向旋转轴正方向, 右手握拳时的 4 指方向为旋转正方向。</p> <p>(参照图 8.2.9.3)</p>
矢量分量	<p>重力方向设定为「矢量设定」时, 设定重力方向在 X, Y, Z 方向的分量。</p> <p>补充说明: 此处的「矢量设定」仅用来设定重力方向, 对重力加速度的大小无影响。</p>



(a) 6 方向设定



(b) 任意角度设定



(c) 矢量设定 (Ver.17 的新功能)

图 3.4.1 重力方向的设定方法

3) 输出数据

无变更。

4) 适用网格形状

垂直网格及混合格。

5) 计算结果示例

为验证计算结果使用的简易模型，重力方向的“矢量设定”及充型流动过程的计算结果分别如图 3.4.2，图 3.4.3 和图 3.4.4 所示。由图 3.4.4 可见，液体金属沿着“矢量设定”的重力方向下落，“矢量设定”的重力方向。

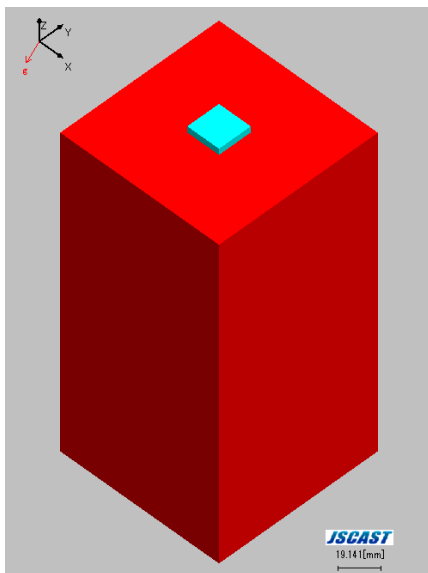


图 3.4.2 简易模型

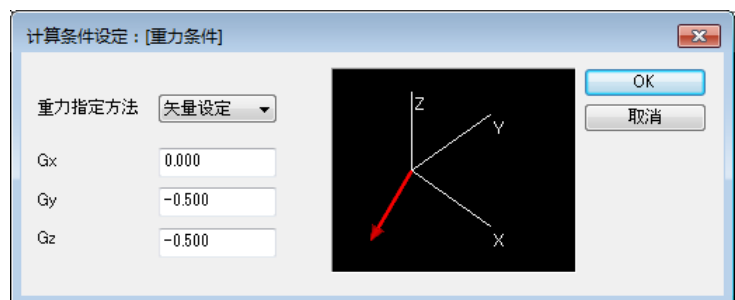


图 3.4.3 重力方向：矢量设定

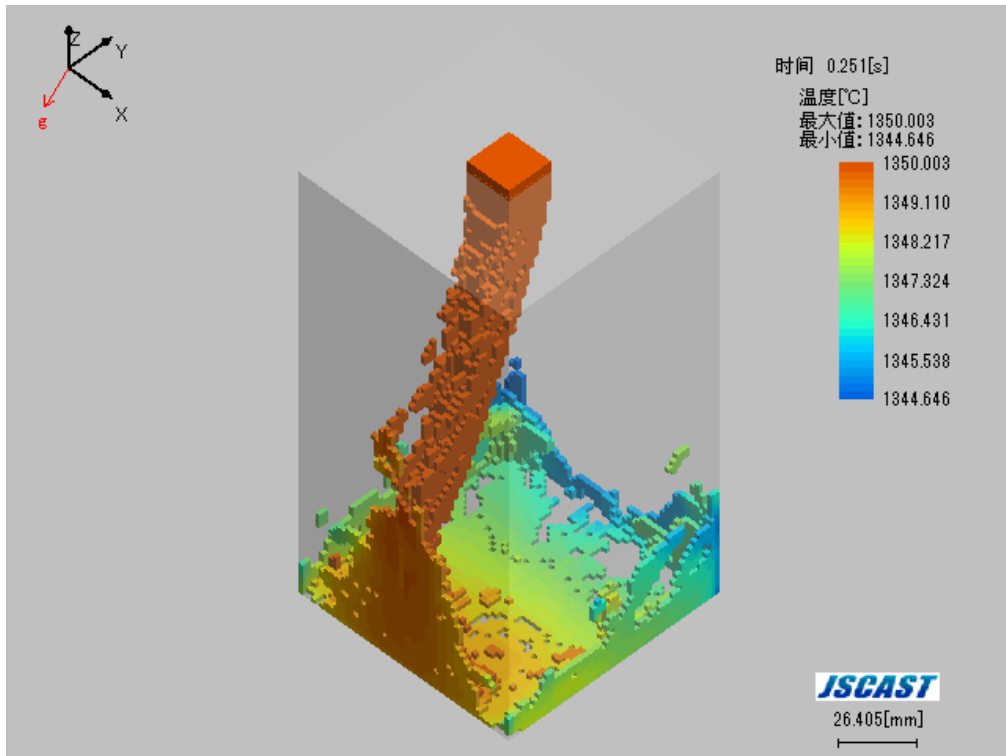


图 3.4.4 重力矢量设定后的计算结果示例

3-5 统一内浇道流入区别显示与内浇道流量变化曲线的显示颜色 (标准模块功能)

1) 概要

某些用户指出,“内浇道流入区别显示”中使用的颜色和“内浇道流量变化曲线”中使用的颜色不统一,需花费额外时间找出不同颜色间的对应关系,使用时不太方便。为了解决此问题,新版本(Ver.17)中,“内浇道流量变化曲线”所使用的颜色自动和“内浇道流入区别显示”中使用的颜色保持一致。另外,任意变更“内浇道流入区别显示”中使用的颜色,“内浇道流量变化曲线”的颜色也会随之变更。

2) 输入数据

无变更。

3) 输出数据

内浇口流入区别显示所使用的颜色。

4) 适用网格形状

垂直网格及混合网格。

5) 计算结果示例

图 3.5.1 中的(a)和(b)分别为“内浇道流入区别显示”与“内浇道流量变化曲线”的显示结果示例。在图 3.5.1(a)中,将“设定区域4”的显示颜色修改为橙色后,“内浇道流量变化曲线”的显示颜色也会随之变更为橙色。

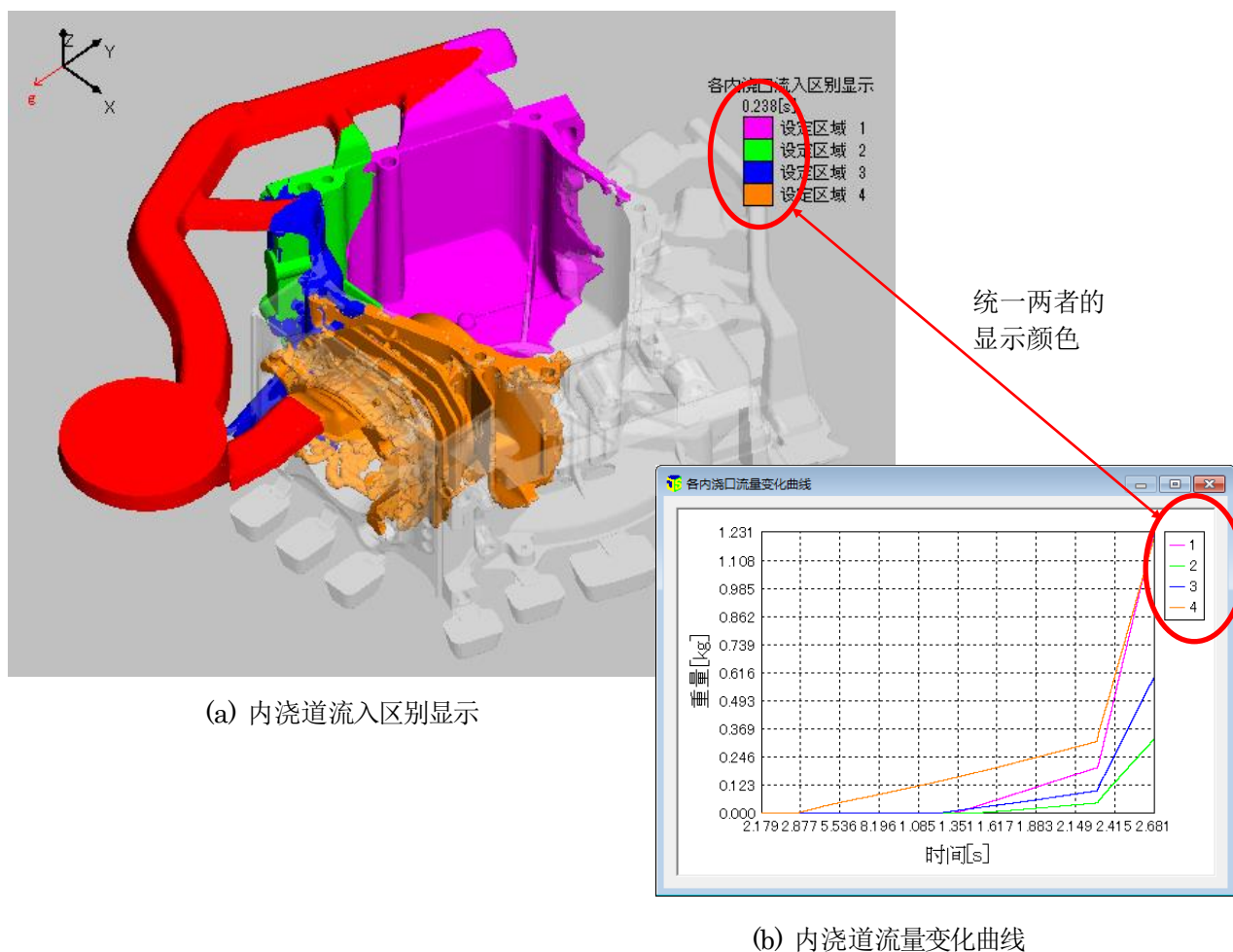


图 3.5.1 统一内浇道流入区别显示与内浇道流量变化曲线的显示颜色