



热工水力系统分析程序Courant条件计算方法研究

李江宽, 黄涛, 林萌, 王旭, 陈俊杰

Study on Calculation Method of Courant Limit in Thermal Hydraulic System Analysis Code

Li Jiangkuan, Huang Tao, Lin Meng, Wang Xu, and Chen Junjie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2021.04.0063>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

热工水力系统程序中数值水锤问题研究

Research of Water Packing Numerical Problem in Thermal Hydraulic System Code

核动力工程. 2021, 42(3): 59–63

铅铋冷却沸水快堆热工水力系统安全分析程序开发

Development of Analysis Code for Pb–Bi Cooled Direct–Contact–Boiling Water Fast Reactor System

核动力工程. 2018, 39(4): 67–70

板型燃料元件反应堆瞬态热工水力分析程序的开发与验证

Development and Verification of Thermal–Hydraulic Transient Analysis Code in Plate–Type Fuel Nuclear Reactor

核动力工程. 2019, 40(5): 18–22

基于Modelica的两相热工水力特性仿真模型架构与概念验证

Simulation Model Architecture and Concept Validation for Thermal Hydraulic Characteristics of Two–Phase Fluid Based on Modelica

核动力工程. 2021, 42(1): 1–7

安全壳过滤排放系统长期运行热工水力特性分析

Thermal–Hydraulic Characteristics of Filtered Containment Venting System for Long–Term Operation

核动力工程. 2019, 40(4): 44–49

基于Relap5的ACME台架全厂断电整体试验数值分析

Numerical Analysis of ACME Station Blackout Integral Effect Test with Relap

核动力工程. 2019, 40(3): 98–102



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2021)04-0063-05; doi:10.13832/j.jnpe.2021.04.0063

热工水力系统分析程序 Courant 条件计算方法研究

李江宽¹, 黄涛², 林萌^{1*}, 王旭¹, 陈俊杰²

1. 上海交通大学核科学与工程学院, 上海, 200240;
2. 中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610213

摘要: 为分析采取不同 Courant 条件计算方法对反应堆热工水力系统分析程序计算速度和计算准确性的影响, 研究了 2 种 Courant 条件计算方法: 综合法与分组法, 分析了 2 者的计算原理, 并分别采取这 2 种方法对压水堆满功率稳态工况和大破口事故工况进行计算。结果表明, 稳态工况下 2 种方法的程序计算结果无明显差异; 在速度场变化剧烈的大破口事故工况下, 综合法可以取得更加准确的计算结果但耗时较多, 分组法可以取得更快的计算速度但计算准确性较低。

关键词: 热工水力; 系统程序; Courant 条件; RELAP5

中图分类号: TL334 **文献标志码:** A

Study on Calculation Method of Courant Limit in Thermal Hydraulic System Analysis Code

Li Jiangkuan¹, Huang Tao², Lin Meng^{1*}, Wang Xu¹, Chen Junjie²

1. School of nuclear science and engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China;
2. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: In order to analyze the influence of different Courant limit calculation methods on the calculation speed and accuracy of reactor thermal hydraulic system analysis code, two kinds of Courant limit calculation methods were studied: synthesis method and grouping method. The calculation principles of the two methods were analyzed, and the two methods were adopted to calculate the steady-state condition and large break loss of coolant accident condition of a PWR respectively. The results show that there is no significant difference between the two methods in steady-state condition; in the case of large break loss of coolant accident with drastic change of velocity field, the synthesis method can obtain more accurate calculation results, but it takes more time, and the grouping method can obtain faster calculation speed, however its calculation accuracy is lower.

Key words: Thermal hydraulic, System code, Courant limit, RELAP5

0 引言

以分析流体系统的流动及传热现象为目的的反应堆热工水力系统分析程序是进行核电厂设计、安全评审和运行监督等过程的重要工具, 对于提

升核电厂的安全性和经济性具有重要作用^[1]。反应堆热工水力系统程序在使用数值方法求解前会对流体动力学方程和热力学方程进行时间和空间上的离散, 而这些离散将影响程序计算的准确

收稿日期: 2020-07-01; 修回日期: 2021-03-31

基金项目: 十三五核能开发科研项目“基于深度学习神经网络人工智能的船用核动力装置故障诊断技术研究”

作者简介: 李江宽(1993—), 男, 博士研究生, 现主要从事热工水力及故障诊断方面研究, E-mail: lijiankuan@sjtu.edu.cn

*通讯作者: 林萌, E-mail: limeng@sjtu.edu.cn

性^[2]。大多数热工水力系统分析程序会根据 Courant 条件限制时间步长的大小,以保证离散后计算结果的稳定性和准确性^[3-4]。目前有关不同 Courant 条件计算方法对程序计算影响的相关研究较少,而这对热工水力系统分析程序的建模计算和结果分析具有重要意义^[5]。因此本文研究了热工水力系统分析程序 2 种不同的 Courant 条件计算方法:综合法与分组法,分别分析了其计算方法和特点,并以一个 4 环路压水堆的满功率稳态工况和冷管段大破口事故工况为算例,通过 RELAP5/MOD3.3 程序分析了不同 Courant 条件计算方法对热工水力系统分析程序计算速度和准确性的影响。

1 Courant 条件计算方法

热工水力系统分析程序可采取交错网格的形式进行空间离散^[2],上游控制体和下游控制体为质量和能量单元,连接件为以上下游控制体边界面为中心、由 2 个控制体体积的一半组成的动量单元,在质能单元和动量单元上分别定义有控制体平均速度与连接件速度。在瞬态计算中通过连接件上的速度方向确定上下游控制体,同一连接件内的气相和液相流体可以有不同的上游控制体。热工水力系统分析程序可以采用综合法或分组法计算 Courant 条件以限制时间步长大小。

1.1 综合法

综合法在质量单元上求解质能 Courant 条件,在动量单元上求解动量 Courant 条件,并取 2 者的最小值作为系统的最终 Courant 条件。质能 Courant 条件的意义是限制时间步长大小以保证从一个控制体中移出的质量不超过当前时间步长计算开始时控制体内的质量;动量 Courant 条件的意义是限制时间步长大小以保证从一个连接件中移出的动量不超过当前时间步长计算开始时连接件内的动量。

1.1.1 质能 Courant 条件 在计算质能 Courant 条件时,首先在控制体中分别计算液相质能 Courant 条件 $[(\Delta t_{c1})_{ij}]$ 和气相质能 Courant 条件 $[(\Delta t_{c1})_{gj}]$,如式(1)、式(2)所示,且取 2 者的较小值作为该控制体的质能 Courant 条件 $[(\Delta t_{c1})_{upstream}]$ 。计算 $(\Delta t_{c1})_{ij}$ 和 $(\Delta t_{c1})_{gj}$ 时要求控制体各相体积分数均不低于设定的限值。

$$(\Delta t_{c1})_{ij} = \frac{V_{upstream}}{A_1 v_{f1} + A_2 v_{f2} + \dots + A_n v_{fn}} \quad (1)$$

$$(\Delta t_{c1})_{gj} = \frac{V_{upstream}}{A_1 v_{g1} + A_2 v_{g2} + \dots + A_n v_{gn}} \quad (2)$$

式中, $V_{upstream}$ 为某控制体体积, m^3 ; $A_1 \sim A_n$ 为以该控制体为上游控制体的连接件面积(连接件可能存在多个), m^2 ; $v_{f1} \sim v_{fn}$ 和 $v_{g1} \sim v_{gn}$ 分别为连接件上的液相速度和气相速度, m/s 。选取所有控制体质能 Courant 条件的最小值作为系统的质能 Courant 条件 $[(\Delta t_{c1})_{system}]$ 。

1.1.2 动量 Courant 条件 在计算动量 Courant 条件时,首先在连接件中分别计算液相动量 Courant 条件 $[(\Delta t_{c2})_{ij}]$ 和气相动量 Courant 条件 $[(\Delta t_{c2})_{gj}]$,如式(3)、式(4)所示,且取 2 者的较小值作为该连接件的动量 Courant 条件 $[(\Delta t_{c2})_{junction}]$ 。

$$(\Delta t_{c2})_{ij} = \frac{0.5(\Delta x_{upstream} + \Delta x_{downstream})}{v_{downstream,f}} \quad (3)$$

$$(\Delta t_{c2})_{gj} = \frac{0.5(\Delta x_{upstream} + \Delta x_{downstream})}{v_{downstream,g}} \quad (4)$$

式中, $\Delta x_{upstream}$ 和 $\Delta x_{downstream}$ 分别为连接件的上游控制体长度和下游控制体长度, m ; $v_{downstream,f}$ 和 $v_{downstream,g}$ 分别为下游控制体的液相和气相体积平均速度, m/s 。在计算动量 Courant 条件时,必须满足液相动量和气相动量在连接件总动量中的比例均不低于设定的限值。选取所有连接件动量 Courant 条件的最小值作为系统的动量 Courant 条件 $[(\Delta t_{c2})_{system}]$ 。

最终选取 $(\Delta t_{c1})_{system}$ 与 $(\Delta t_{c2})_{system}$ 的较小值作为 $(\Delta t_c)_{system}$ 。综合法不允许时间步长的大小超过 Courant 条件。

1.2 分组法

分组法下质能 Courant 条件 (Δt_c^2) 计算式如下:

$$\Delta t_c = \Delta x \frac{\max(\alpha_f, \alpha_g)}{\max(|\alpha_f v_f|, |\alpha_g v_g|)} \quad (5)$$

式中, α_f 、 α_g 分别为控制体液相和气相体积份额; v_f 、 v_g 分别为控制体液相和气相体积平均速度, m/s ; Δx 为控制体长度, m 。

分组法将系统内的控制体随机分为 n 组 ($n \geq 2$),取每组内控制体质能 Courant 条件的最小值并排序,如式(6)所示,选取 Δt_c^2 作为 $(\Delta t_c)_{system}$ 。为避免因空间离散不佳出现过小 Courant 条件导致程序计算极度缓慢的情况,分组法允许时间步

长的大小超过部分控制体的 Courant 条件。在 RELAP5/MOD3.3 程序中 n 为 5。

$$\Delta t_c^1 \leq \Delta t_c^2 \leq \dots \leq \Delta t_c^n \quad (6)$$

模型节点划分会对 Courant 条件的计算产生影响, 由式 (1)~式 (5) 可知, 在使用综合法时需要注意控制体体积、上下游控制体长度之和、连接件面积的值, 避免出现过小的 Courant 条件进而影响程序计算速度, 而使用分组法时只需要注意单个控制体长度。

2 方法应用计算分析

为分析不同 Courant 条件计算方法对程序计算准确性的影响, 对一个 4 环路压水堆的满功率稳态工况与大破口事故工况进行了计算。为简化建模将 3 个完整回路合并为一个回路, 破口大小为 100%。使用 RELAP5/MOD3.3 程序进行计算, 选择半隐式求解方案, 设置最大时间步长 0.50 s、最小时间步长 1.0×10^{-7} s。在 RELAP5/MOD3.3 程序中, 通过输入卡的 1 号卡选择 Courant 计算方法。

2.1 满功率稳态工况分析

分别使用上述 2 种 Courant 计算方法对压水堆满功率稳态工况进行计算, 计算性能参数如图 1 所示。

由图 1a 可知, 在稳态情况下综合法 Courant 条件与分组法下 Courant 条件相同。在稳态工况下, 综合法计算得到的质能 Courant 条件和动量 Courant 条件分别为 0.041 s 和 0.060 s, 最终的 Courant 条件由质能 Courant 条件决定。由图 1b 可知, 综合法与分组法下计算采取的时间步长数值及趋势与 Courant 条件一致, 这说明满功率稳态工况计算下时间步长完全由 Courant 条件限制, 并无其他因素使时间步长缩减。由图 1c 可知, 综合法与分组法下程序计算耗时无明显差距, 这是因为二者时间步长数值及趋势相近。

在每个离散的时间点上 RELAP5 程序会分别计算由质量连续方程和状态方程得到的控制体密度, 由 2 种密度求得的系统质量间的差值称为计算质量误差, 计算质量误差在一定程度上反映程序计算的准确性, RELAP5/MOD3.3 程序要求计算质量误差不能超过系统总质量的 8×10^{-3} 倍^[2]。

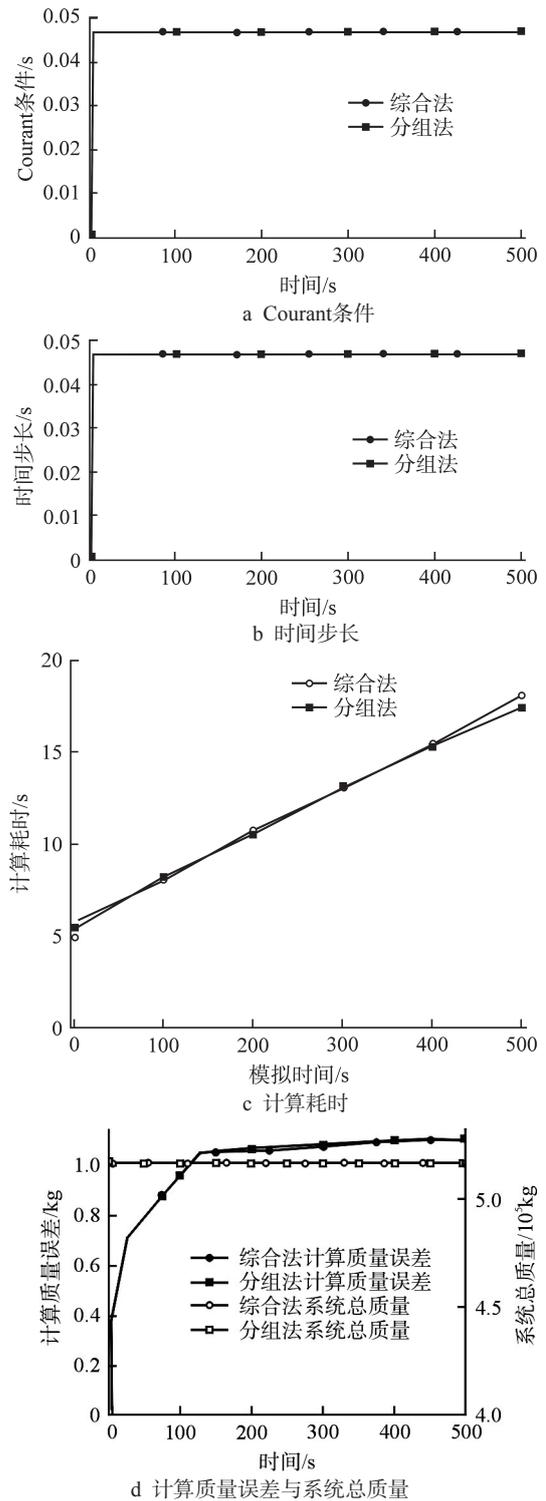


图 1 满功率稳态工况计算性能参数

Fig. 1 Calculation Performance Parameters under Full Power Steady State Condition

图 1d 为计算质量误差与系统总质量, 可知综合法与分组法下程序的计算质量误差与系统总质量在数值和趋势上没有明显差别, 这表明在稳

态工况时 2 种 Courant 条件计算方法下程序计算的准确性基本一致。

2.2 大破口事故工况分析

大破口事故工况计算性能参数如图 2 所示。图 2a 为程序的 Courant 条件，综合法和分组法下 Courant 条件的均值分别为 0.053 s 和 0.069 s，整体上看程序在使用综合法计算时得到了更为严格的 Courant 条件，这是由于综合法在计算时不允许违反质能 Courant 条件，而分组法在计算时允许部分控制体违反质能 Courant 条件，除此之外，综合法还考虑了动量单元上的动量 Courant 条件，进一步限制了最终 Courant 条件。

图 2b 为程序所采取的时间步长，综合法和分组法下时间步长的均值分别为 0.051 s 和 0.066 s，在前 200 s 分组法下的时间步长整体上大于综合法，这是因为分组法计算得到的 Courant 条件大于综合法；200 s 后分组法下的时间步长波动幅

度大于综合法，分组法具有较大的时间步长上限是由于分组法计算得到的 Courant 条件更大，分组法具有较小的时间步长下限是由于在较大的时间步下计算时，计算结果不满足 RELAP5 程序的其他要求而对时间步长进行了缩减处理。由图 2c 可知，分组法下程序计算速度更快，这是因为分组法下取得了更大的时间步长均值。图 2d 为程序的质量误差与系统总质量，综合法和分组法下质量误差均值分别为 103.04 kg 与 99.07 kg，说明综合法下程序计算的准确性更高。

图 3、图 4 分别为综合法与分组法 Courant 条件计算方法下的堆芯出口压力对比、破口流量对比，可知综合法与分组法下破口压力、破口流量的计算结果均存在较为明显的差异，导致这些差异的原因主要有：受所求得的 Courant 条件不同的影响，综合法和分组法下程序求解采用的时间步长存在较为明显的差异，时间步长的差异导

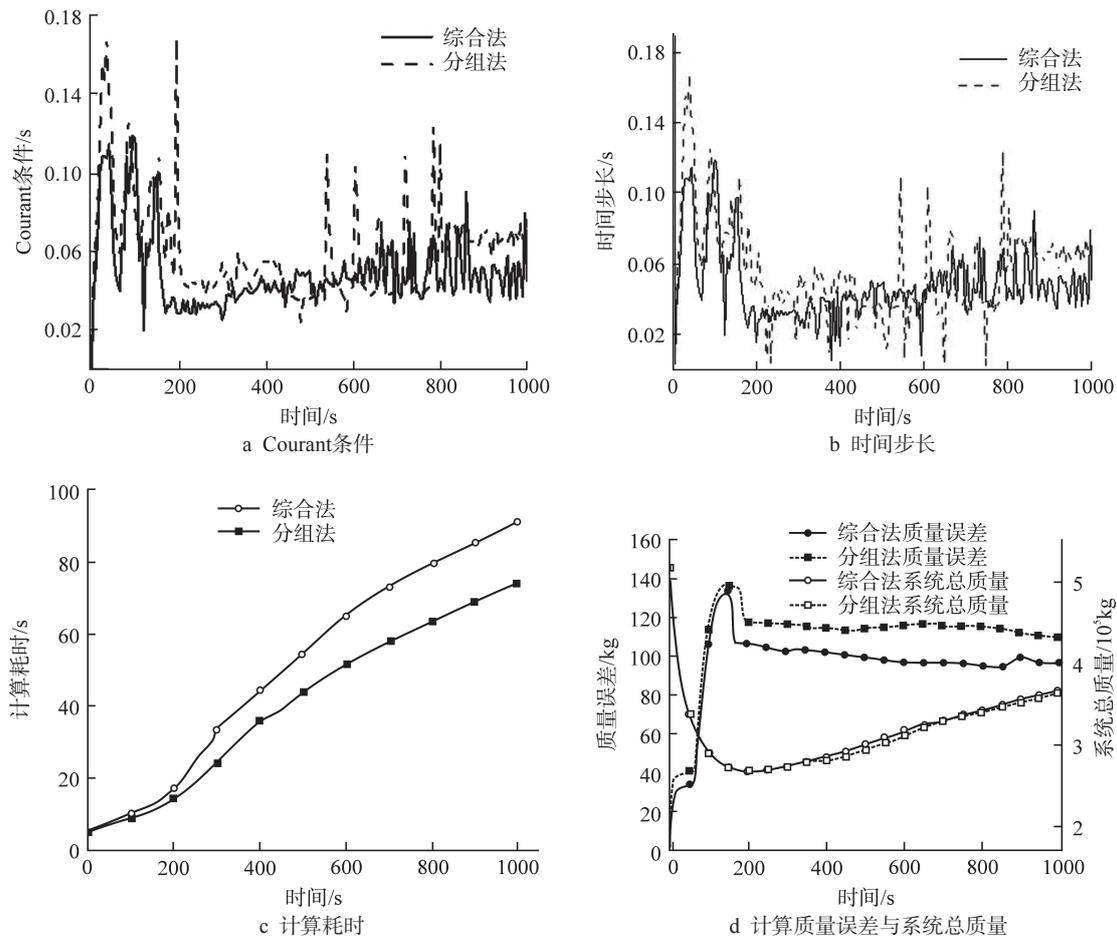


图 2 大破口工况计算性能参数

Fig. 2 Calculation Performance Parameters under Large Break Loss of Coolant Condition

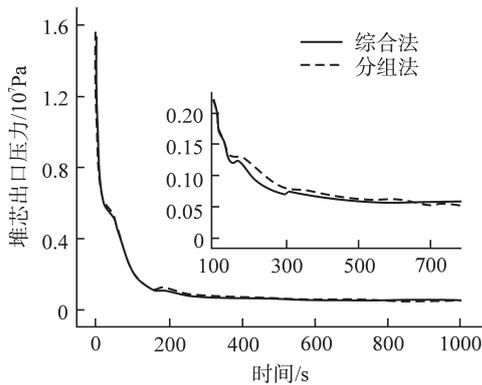


图3 堆芯出口压力对比

Fig. 3 Comparison of Core Outlet Pressure

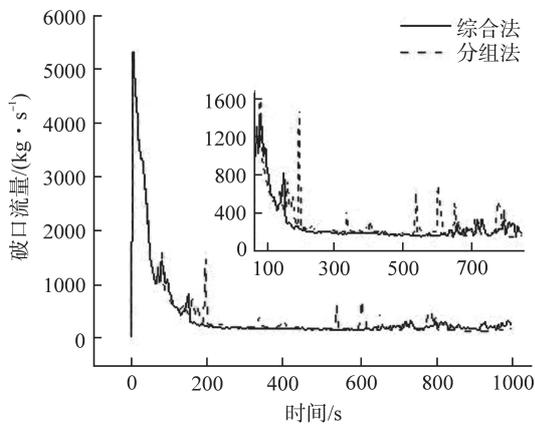


图4 破口流量对比

Fig. 4 Comparison of Flow at Break

致了参数求解结果的差异；综合法和分组法下程序求解动量方程的稳定性不同，分组法不考虑动量 Courant 条件且存在一定数量的控制体违反 Courant 条件，而大破口事故工况下系统速度场变化剧烈，进一步加剧了动量方程求解的不稳定，影响了参数计算结果的准确性。

3 结论

本文研究了反应堆热工水力系统分析程序的 2 种 Courant 条件计算方法：综合法与分组法，并以压水堆满功率稳态工况和大破口事故工况为算例，通过 RELAP5/MOD3.3 程序分析了不同

Courant 条件计算方法对热工水力程序计算的影响。

(1) 在计算方法方面，综合法同时考虑了质能 Courant 条件和动量 Courant 条件，且严格不允许违反 Courant 条件限制；分组法只考虑质能 Courant 条件，且允许部分控制体违反 Courant 限制，因此从理论上讲综合法更能保证动量方程求解的稳定性，但分组法能在一定程度上避免程序因过小的 Courant 条件而计算缓慢的问题。

(2) 稳态工况计算比较稳定时，综合法与分组法下程序的 Courant 条件基本一致，动量方程求解的稳定程度相当，且时间步长、计算耗时、质量误差和计算参数无明显差异。

(3) 在大破口事故工况下计算参数变化剧烈时，综合法与分组法下程序的 Courant 条件及其影响的时间步长、计算质量误差等存在较明显差异。分组法在计算效率上有一定优势，而综合法由于同时考虑了质能 Courant 条件和动量 Courant 条件且严格不允许违反 Courant 条件，计算速度相对较慢但可以得到更加准确的计算结果。

参考文献：

- [1] 刘志毅, 秦本科, 解衡, 等. 压水堆核电站热工水力系统程序的研究现状与趋势[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(11): 966-972.
- [2] The RELAP5 Code Development Team. RELAP5/Mod3.3 Code Manual, Volume I: Code Structure, System Models and Solution Methods, NUREG/CR-5535, Revision 1[M]. Idaho: INEEL, 2001: 15-74.
- [3] 王强, 高璞珍, 王忠乙, 等. 低压高过冷度下自然循环流动不稳定性实验研究[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(5): 822-828.
- [4] 刘新凯, 刘建阁, 彭敏俊. 基于RELAP5程序的直管式直流蒸汽发生器敏感性分析[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(9): 1088-1096.
- [5] MAHAFFY J H. Numerics of codes: stability, diffusion, and convergence[J]. Nuclear Engineering and Design, 1993, 145(1-2): 131-145.

(责任编辑: 邱彦)