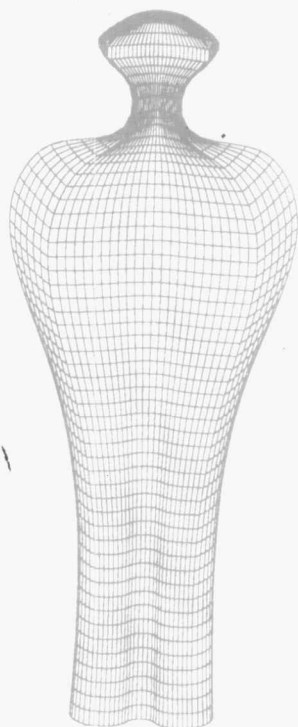


CFD与建筑环境设计

[日] 村上周三 著
朱清宇 等 译



COMPUTATIONAL
ENVIRONMENT DESIGN
FOR
INDOOR AND OUTDOOR
CLIMATES

中国建筑工业出版社



CFD与 建筑环境设计

[日] 村上周三 著
朱清宇 等 译



COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS
ENVIRONMENTAL DESIGN
FOR
INDOOR AND OUTDOOR
CLIMATES

人体四周流场解析用的早期CFD模型。表面是CFD解析用的网格划分。

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2005-5406号

图书在版编目(CIP)数据

CFD与建筑环境设计/(日)村上周三著;朱清宇等译.
北京:中国建筑工业出版社,2007
ISBN 978-7-112-08981-9

I. C... II. ①村... ②朱... III. 计算流体力学-应用-建筑设计:环境设计 IV. TU-856

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第001374号

CFD ni yoru Kenchiku and Toshi no Kankyo Sekkei Kogaku
Copyright © 2000 by Shuzo MURAKAMI
Chinese translation rights in simplified characters arranged with University of Tokyo Press, Tokyo through Japan UNI Agency, Inc., Tokyo

本书由东京大学出版会授权翻译出版

责任编辑:姚荣华
责任设计:董建平
责任校对:李志立 刘钰

CFD与建筑环境设计

[日]村上周三 著
朱清宇等 译

*

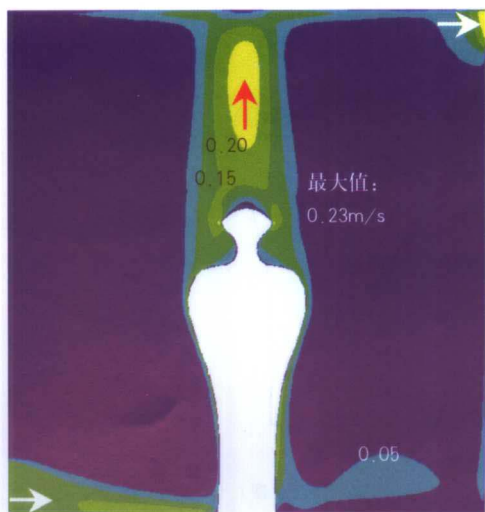
中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)
新华书店经销
北京嘉泰利德公司制版
北京建筑工业出版社印刷

*

开本:787×960毫米 1/16 印张:28% 插页:4 字数:434千字
2007年4月第一版 2007年4月第一次印刷
定价:80.00元
ISBN 978-7-112-08981-9

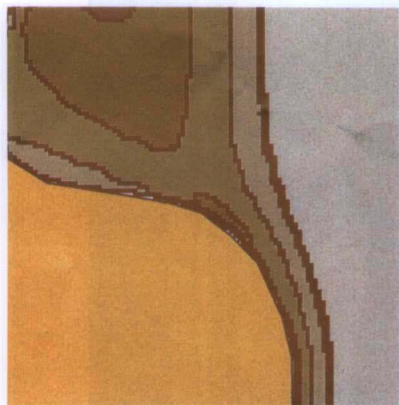
(15645)

版权所有 翻印必究
如有印装质量问题,可寄本社退换
(邮政编码100037)
本社网址: <http://www.cabp.com.cn>
网上书店: <http://www.china-building.com.cn>



人体表面网格划分

彩图1 人体四周产生的上升热气流的数值解析结果 (单位: m/s)
(参见图2.3~图2.5)

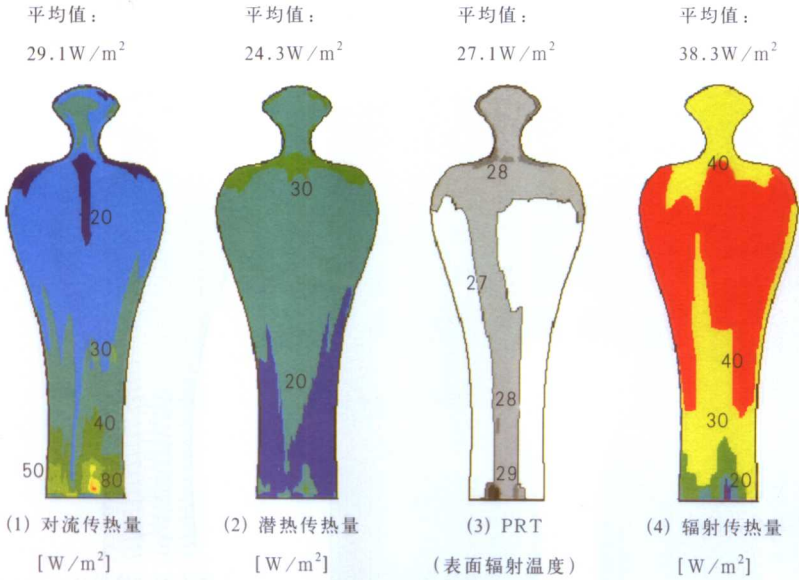


(1) 数值解析结果

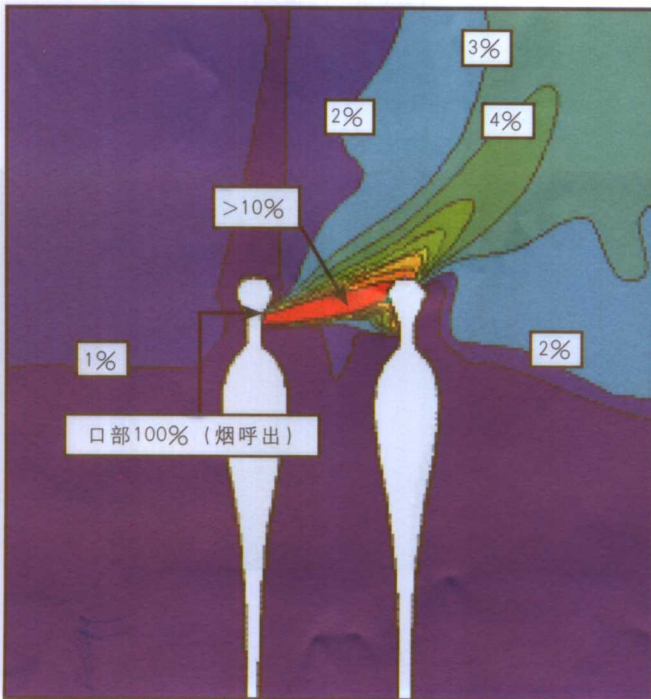


(2) 人体模型实验结果

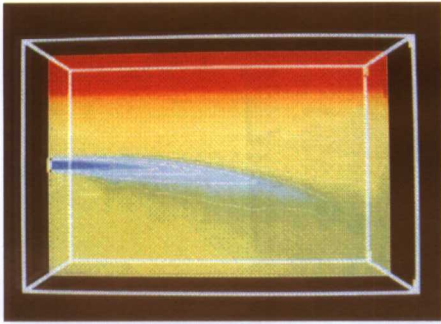
彩图2 人体四周上升热气流的可视化 (肩膀附近)



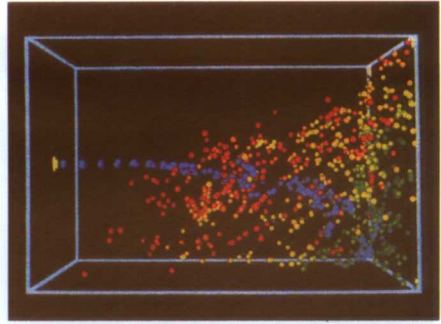
彩图3 人体表面传热特性的数值解析 (参见图2.9)



彩图4 被动式吸烟的数值解析 (参见图2.15)

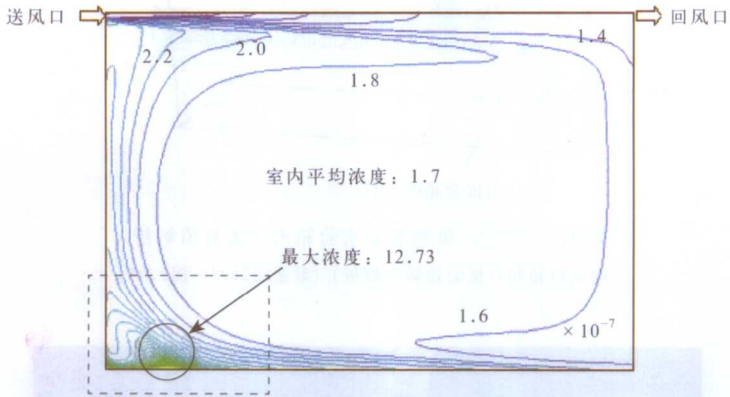


(1) 送风气流的轨迹

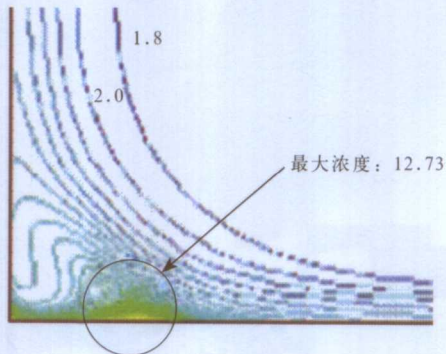


(2) 送风气流的空气龄

彩图5 空调工况下室内气流的数值解析 (参见2.2.3、2.3.4)

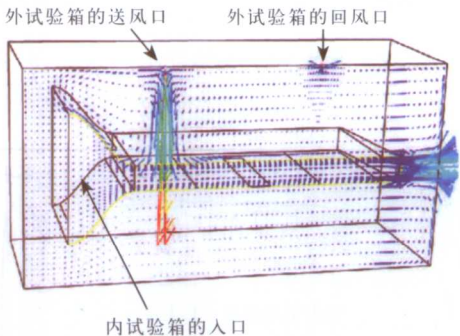
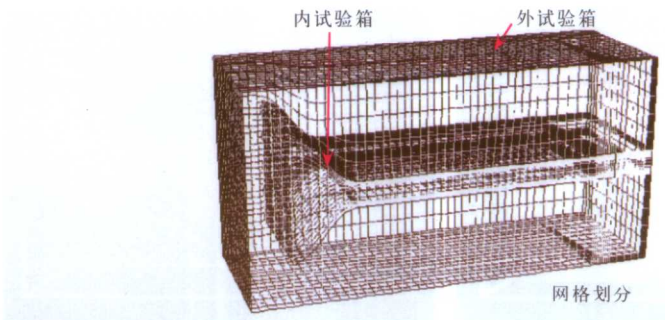


(1) 室内循环气流及浓度分布 (无量纲, 换气次数: 1.6/h)



(2) 地面附近的高浓度区域

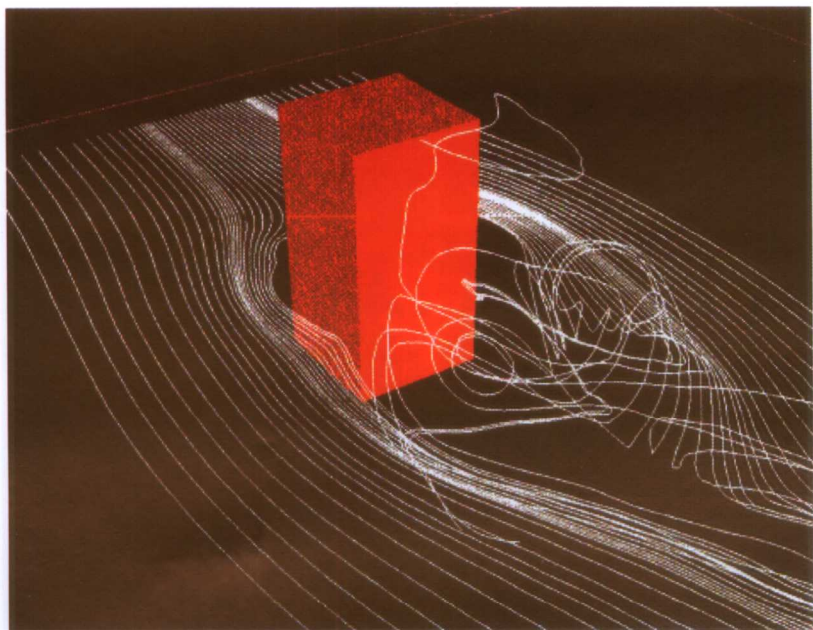
彩图6 室内地面散发化学污染物的数值解析 (参见图2.84)



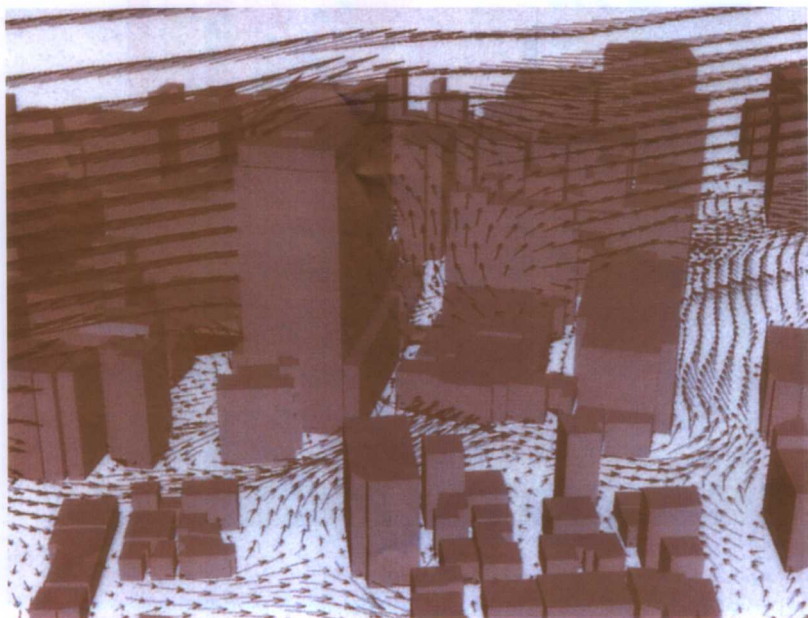
彩图7 化学污染物散发实验箱内气流数值解析
(内试验箱和外试验箱耦合解析) (参见图2.93~图2.95)



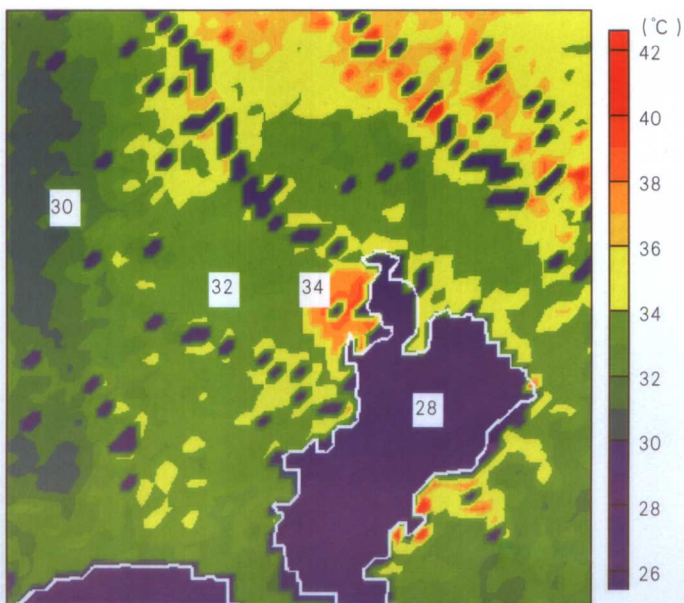
彩图8 东京国际会议中心的采暖工况下气流解析 (参见图2.105)



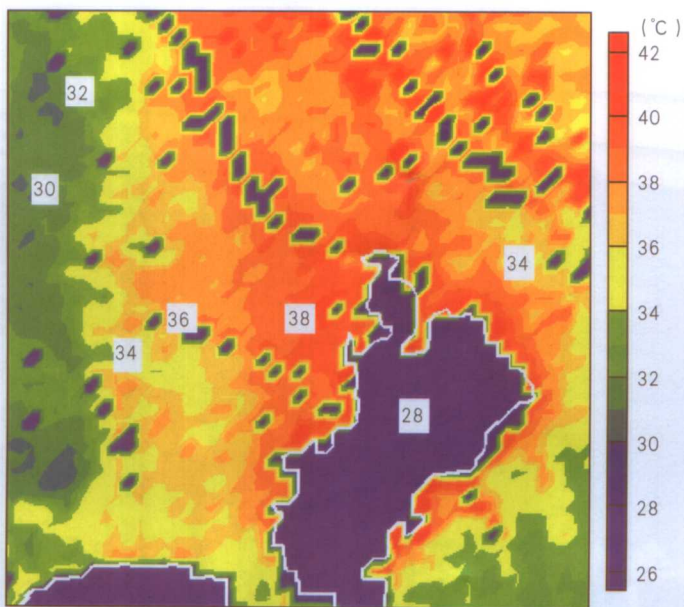
彩图9 2维角柱四周的流线 (参见图2.6.4)



彩图10 城市街道楼宇风的数值解析 (参见图2.142)



(1) 江户时代



(2) 现状

彩图11 东京地区城市气候的数值解析：伴随城市化的发展
地表面温度的变化（参见图2.199~图2.200）

译者的话

计算流体力学 (CFD) 在近 20 年得到了飞速的发展, 广泛应用于建筑环境等很多工程领域。近几年, 在国内的建筑环境领域 CFD 计算方法得到广泛应用, 但缺乏基础理论指导, 缺乏用于建筑环境领域的高精度的湍流模型开发和实验·实测的认证。阐述计算流体力学基础理论的著作有很多, 但在国内还未见关于在建筑室内外环境中 CFD 理论及其工程应用的专著。

本书是国际著名建筑环境和风工学学者、庆应义塾大学工学部教授村上周三关于 CFD 与建筑环境的专著。村上周三教授从 20 世纪 80 年代起就从事建筑室内和室外环境中计算流体力学的理论研究和工程应用技术的开发, 本书是著者 20 多年的教学和科研成果的集大成之作。本书囊括了室内外建筑环境中 CFD 应用的各种实际问题, 是一本理论和实际应用相结合的高水平实用专业著作。目前, 在国际上涉及建筑工程应用及其相关理论指导也仅此一本专著。

全书分为 3 篇。第 1 篇为理论篇, 主要论述在室内和室外的建筑环境中 CFD 的湍流物理模型的特点, 以及针对室内外环境的特点而开发的湍流物理模型。同时特别介绍了在室内外环境中对流和辐射的耦合解析方法的开发。第 2 篇为应用篇, 通过室内外建筑环境中 CFD 的大量应用实例论述了在室内外建筑环境中 CFD 计算方法的应用原理。第 3 篇提出把 CFD 作为建筑环境中开发应用的设计工具的新概念。特别介绍了通过在 CFD 计算中增加自动反馈计算方法, 可以优化空调系统和设计方案, 并达到了满足设计指标和显著的节能效果。

本书因其丰富的理论以及严谨的实验·实测的验证,故对 CFD 计算方法的应用具有指导作用,可作为工程设计人员和科研人员的案头专著,也可作为大学院校师生的专业参考书。本书的出版将会极大地促进国内的建筑环境中 CFD 的工程应用及其科研技术的开发。

本书的翻译工作由朱清宇策划和组织,由中国建筑科学研究院空调所朱清宇,东京大学生产技术研究所陈宏、黄弘、朱晟伟,哈尔滨工业大学刘京、朱岳梅翻译。朱清宇负责前言、第 1 篇的 1.1~1.4、第 2 篇的 2.4~2.5,陈宏负责第 1 篇的 1.5~1.7、第 2 篇的 2.6~2.8、第 3 篇的 3.6~3.7,黄弘负责第 1 篇的 1.8~1.10、第 2 篇的 2.9、第 3 篇的 3.8~3.9,刘京负责第 1 篇的 1.11、第 2 篇的 2.2~2.3,朱晟伟负责第 2 篇的 2.1,朱岳梅负责第 3 篇的 3.1~3.5。朱清宇任译文主编,负责译文统稿和修改。

本书的翻译得到了中国建筑科学研究院空调所领导的指导和大力支持,在此表示衷心的感谢。本书的出版得到了中国建筑工业出版社的大力支持,特别是编辑的辛勤工作,在此表示敬意和感谢。

本书若有表达不当或错误之处,敬请读者批评指正。

朱清宇

2006 年 12 月 18 日

前 言

近几年来, CFD (Computational Fluid Dynamics: 计算流体力学) 技术发展很快。在很多专业领域应用流体力学理论来解决工程实际问题, 在建筑环境工学领域也没有例外。笔者从以湍流现象为研究对象的 CFD 在工学领域中应用初始阶段, 就一直在从事环境工学领域中 CFD 技术应用的开发和研究, 对近几年 CFD 技术的兴起有着特别的感受。

本书系统总结了在建筑环境工学中 CFD 技术应用的理论基础和应用方法, 特别是利用 CFD 所取得的系统化知识, 笔者对建筑环境解析和环境规划的专业领域进行了学术上的再构成。本书不是概述 CFD 的一般书籍, 而是把 CFD 作为一种手段和工具, 以怎样在建筑环境设计中灵活运用 CFD 技术作为本书阐述的侧重点。由于本书以 CFD 的应用为论述中心, 所以和 CFD 的基础研究相比, 本书部分地方有欠严谨之处, 还请谅解。

最近, 利用 CFD 技术的流体解析可以把辐射传热以及水蒸气传输等物理现象进行耦合解析, 这样可以针对由各种复杂因素形成的环境物理现象进行机理分析。随着耦合解析技术的开发, CFD 从仅仅是一种解析技术手段发展成为建筑环境设计的强有力的设计工具。通过对耦合技术的开发, 该领域的知识结构体系得到了重新整理。耦合解析的论述及其应用是本书的核心内容。

此外在本书中, 从人体周边微小的局部区域, 到实际建筑物的大小, 再到都市·地域的广大区域, 论述了各种大小的环境解析实例。

着眼于各种不同大小区域之间的有机关联而编写本书的内容也是本书的特征之一。

本书的构成有 3 篇。第 1 篇是关于 CFD 数值解析方法和湍流模型的基本原理论述，具有浓厚的教科书色彩。但是关于 CFD 的理论基础并没有全面地论述，而是以和建筑环境问题密切相关的湍流解析内容为主。在第 2 篇中，通过 CFD 和耦合解析方法分析了与居住环境相关的各种环境问题，介绍并解说了进行环境解析的思路和具体实例。各章是由每个独立的环境问题主题而构成的。在本篇中，随着章节号的增加，所考察的环境对象由小变大，从以人体为研究对象到以都市范围为研究对象。此外在本篇中，相关部分特别详细的解说以小的活字表示，以近似于注明的形式来说明。关于这一部分的说明是特别针对抱有感兴趣的读者，而不需要详细说明的读者建议跳过该段落。第 3 篇是在建筑环境问题中 CFD 技术应用的集大成，论述了 CFD 作为设计技术的利用方法。在这里，特别阐述了 CFD 在建筑环境解析中增加自动反馈机构的新概念，并介绍了该概念在设计方法的利用实例。

本书的主要内容之一是各种应用实例的介绍。不同的研究领域有其传统和习惯的表达方式，例如不同的数学公式以及符号的标记方法的情况时有发生。在这里，尽可能消除不同研究领域的不同表达方式，用统一的表达方式表示。出于对传统的尊重，对于不同的表达方式还请谅解。

本书是以笔者多年来在海内外的学术杂志和各种期刊上发表和积累的大量论文和各种解说为基础的。在各个章节中，详细引用了其对应的文献。笔者到目前为止自己发表以及和共同研究者共同发表的 CFD 解析及其应用相关的著作和论文的数量众多。笔者自身处于整理困难的状况，这次通过编写本书，这些著作和论文在一定程度上得到了整理。也就是说本书是以笔者发表过的著作及论文为基础，按各个研究课题进行了有组织的再编辑，撰写而成的。想更为深入了解本书的内容的读者请查阅引用的原著论文。

这些大量的有关 CFD 解析的学术论文是长期以来和笔者一起共同研究的研究者加藤信介、持田灯、大冈龙三，以及在研究室研究和学

习的每个人的共同研究的成果。笔者对这些长期以来刻苦研究的各位表示深深的敬意。在某种意义上，本书是曾在笔者的研究室里共同开展研究活动的各位同仁共同的出版物。

在写作原稿之际，得到了研究室的现有人员以及到近期为止的在职人员的大力帮助。他们是饭冢悟、伊藤一秀、金泰延、金相璉、白石靖幸、林立也、吉田伸治。可以说如果没有他们的紧密协助，也就没有本书的出版。特别是从本书的策划开始阶段得到了饭冢悟先生的大力协助。对饭冢悟先生在内各位表示深深的感谢。此外从本书的策划到完成出版，始终得到了东京大学出版会的井上三男先生的大力支援。没有井上三男先生的协助，同样也不会有本书的出版。

在此，再一次对为本书作出贡献的各位表示深深的谢意。

村上周三

目 录

前言

第 1 篇	CFD 数值解析方法的基础	1
1.1	计算流体力学诞生和实用化的背景	1
1.2	非等温流场的基础方程式、变量和坐标系处理方法	2
1.3	离散化方法	4
1.3.1	有限差分法 (FDM)	4
1.3.2	有限体积法 (FVM)	4
1.3.3	有限元素法 (FEM)	4
1.4	计算法则	5
1.4.1	MAC 法 (旧 MAC 法)	5
1.4.2	SMAC 法	6
1.4.3	HSMAC 法	7
1.4.4	FS 法	8
1.4.5	SIMPLE 法	9
1.5	计算网格与网格生成	10
1.5.1	计算网格	10
1.5.2	网格的生成方法	11
1.6	对流项的差分法	12
1.6.1	对流项差分法的误差	13
1.6.2	各种差分法	13
1.7	边界条件	17

1.7.1	壁面边界条件	18
1.7.2	入口（流入）条件、出口（流出）条件、 自由空间的边界条件	23
1.8	误差评价	24
1.8.1	误差估算法	24
1.8.2	误差解析的实例	26
1.9	湍流模型	29
1.9.1	方程式的求解	30
1.9.2	涡黏性（梯度扩散近似）模型（0方程式、 1方程式、2方程式模型）	31
1.9.3	DSM（应力方程模型）	42
1.9.4	代数应力模型（ASM）	53
1.9.5	LES（Large Eddy Simulation）	55
1.9.6	各种流场的湍流模型适应性的比较	68
1.10	伴随密度变化的低马赫数的压缩性流的解析 （火灾现象的解析）	69
1.10.1	低马赫数的压缩性流体解析的必要性和 问题点	69
1.10.2	低马赫数近似的压缩性流体的基础方 程式及其性质	71
1.10.3	考虑压缩性的湍流模型	74
1.11	对流和辐射的耦合解析	83
1.11.1	居住环境中考虑了相互反射的辐射传热	84
1.11.2	对流·辐射的耦合解析方法	91
1.11.3	室外空间的辐射传热解析	95
第1篇	参考文献	106
第2篇	人体·建筑·都市环境数值解析实例	117
2.1	人体周围微气候解析	117
2.1.1	人体和周围环境之间的热交换	117

2.1.2	用对流、辐射、湿气、热输送的耦合解析 方法解析人体全热散发特性	118
2.1.3	送风方式的差异引起的人体周围微环境的变化	128
2.1.4	上升气流的诱导效果和空气污染	131
2.1.5	被动吸烟的数值解析	134
2.1.6	呼吸区域的气流特性可视化及测量	138
2.1.7	人体吸气势力范围的 CFD 解析	140
2.1.8	风对人体的力学影响的 CFD 解析	142
2.2	利用对流·辐射耦合解析方法研究室内温热 环境的形成机理	148
2.2.1	室内温热环境的形成原因及本章构成	148
2.2.2	稳态流场和非稳态流场	149
2.2.3	应用各种 RANS 模型和 LES 的非等温室 内气流解析	152
2.2.4	非等温条件下室内稳态流场、非稳态流场 的湍流解析模型的改良	156
2.2.5	在稳定分层化流场中开放式水路条件下的 MKC 模型的验证	171
2.2.6	各种 SGS 模型的非等温室内气流的 LES 解析	173
2.2.7	室内温热环境的对流与辐射耦合解析	178
2.2.8	自然通风并用型复合式空调方式	180
2.3	室内扩散场和通风换气效率	189
2.3.1	由流场决定的扩散场、浓度场	189
2.3.2	很难符合完全混合假定条件的流场和浓度场	190
2.3.3	利用概率密度函数的浓度空间分布特性、风 速脉动分布特性的公式	191
2.3.4	空气龄的概念	193
2.3.5	各种通风换气效率指标 SVEs 的定义	193
2.3.6	活塞流和完全扩散场的通风换气特性 (SVE3 和 SVE6) 的评价	196