

外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その173）

自然換気併用外気制御システムをもつゾーンの熱平衡計算

Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST (Part 173)

Heat Balance Solution of Naturally Ventilated Zones with Fresh Air Control Systems

技術フェロー ○郡 公子（宇都宮大学） 技術フェロー 石野 久彌（首都大学東京名誉教授）
特別会員 村上 周三（建築環境・省エネルギー機構）

Kimiko KOHRI*¹ Hisaya ISHINO *² Shuzo MURAKAMI *³

*¹ Utsunomiya University *² Tokyo Metropolitan University

*³ Institute for Building Environment and Energy Conservation

The effects of natural ventilation in spaces and fresh air control systems such as airside economizer, demand control ventilation and energy recovery ventilation on heating and cooling equipment load can be simulated using the implicit solution technique in the BEST. This paper proposes a simulation method of fresh air control systems based on the replacement of a ventilation regulator with a heater for space air temperature control.

1. 序

BEST の熱負荷計算に、自然換気と併用できる外気冷房、在室率に応じた最小外気量制御、全熱交換器の計算機能を追加したので、その計算法と試算結果を報告する。

BEST には、空調設備を簡単に扱う熱負荷計算（非連成計算）と空調設備を詳細に設定して建築との熱平衡状態を解き室内環境からエネルギー消費量まで求める計算（連成計算）の2種類がある。熱平衡の解法は、それぞれの計算に適するようにインプリシット法とエクスプリシット法とを使い分けている。エクスプリシット法で解くエネルギー計算は、幅広く自由な空調方式に対して計算可能であるが、入力項目が多くなりがちであることや、計算上導入する制御の安定性が状況によって異なり、場合によってはチューニングが難しいことが難点である。インプリシット法による熱負荷計算は、従来から使い慣れた手軽な方法で、冷暖房能力内であれば室内温湿度が設定値丁度になるので、結果の比較や二次処理がしやすい。しかし、本来、不連続で非線形な現象を含む設備計算には適していないので、現実に近い設備を想定すると、解を求めることが容易ではなくなる。

複雑な機器構成の計算はエクスプリシット法を利用するとしても、インプリシット法による熱負荷計算において室負荷とともに計算対象とする外気負荷に関しては、省エネ手法の効果のある程度評価できると便利である。そこで、外気制御の計算機能を熱負荷計算に追加することにした。ただし、空調装置と同様に、ゾーンごとに独立した外気制御を行うものとする。この機能により、ファサードの高性能化とともに中間期や冬期に増加する冷房要求に対して、自然換気とともにより低温外気を利用できる外気冷房の効果を検討したり、高性能ファサードと最小外気制御や全熱交換器の組合せによる加熱負荷消

滅の可能性などを、熱負荷計算によって検討できるようになる。

2. 対象とする外気制御と自然換気の方式

表1に、外気制御と自然換気の許可条件をまとめた。外気冷房は、自然換気と同時に行うこともできる。また、外気冷房下限室温を冷房設定室温とは別に設定できる。自然換気と外気冷房の両方が可能な場合は、室温下限値を両者の高い方の値で統一した上で、自然換気を優先し、不足なら外気冷房も行う。最小外気量制御は、下限外気導入量以上であれば、在室率に等しい比率で外気量を絞る。外気冷房中は不許可とするが、それ以外はエネルギー上の有利不利は考慮せずに運転を許可する。全熱交換器は、省エネに配慮する運転を想定できるようにした。空調機で顕熱処理を行っているときのみ運転を許可する。また、内外エンタルピチェックのほか内外温度チェックを行うことも可能で、このときは全熱交換器の効率調整による室温制御（加熱不要とする運転）も行う。最小外気量制御と全熱交換器を併用する場合は、極端な少風量運転を避けるために下限外気導入量を設定できる。AFWの排気を全熱交換器に通す方式は、現在計算できない。

3. 自然換気併用外気制御方式の計算法

インプリシット法による熱負荷計算は、一次式で表される各ゾーンの熱平衡式を連立させて解くもので、未知数は現在の室内温湿度あるいは空調供給熱量である。対象とする外気制御システムは、外気冷房・自然換気による下限室温制御や全熱交換器の熱回収効率調整による室温制御を含んでいる。これを、インプリシット法で解く場合、冷暖房・外気制御・自然換気に関する多種の不連続な運転状態を対象とすることになる。運転状態によって熱平衡式の係数や未知数が変わ

表1 外気制御・自然換気の許可条件

- 外気冷房許可条件 (スケジュール・屋外条件)
 - 1)外気冷房許可期間の換気時間帯
 - 2)外気温度 \geq 下限値 (室内条件)
 - 3)下限値 \leq 外気露点温度 \leq 上限値
 - 4)室温 $>$ 外気温(必須)
 - 5)室内エンタルピ $>$ 外気エンタルピ
 - 6)室温 \geq 下限値 (空調装置条件)
 - 7)加熱処理していない(必須)
- 外気導入量調整

外気導入率100%とすると室温が下限値を下回る場合は、導入率調節により室温を下限値に保つ。
- 全熱交の許可条件 (スケジュール)
 - 1)全熱交運転許可期間の換気時間帯 (室内・空調装置条件)
 - 2)冷却あるいは加熱中(必須)
 - 3)室内エンタルピ $<$ 外気エンタルピ (冷却中)
室内エンタルピ $>$ 外気エンタルピ (加熱中)
 - 4)室温 $<$ 外気温 (冷却中)
室温 $>$ 外気温 (加熱中、加熱不要とするための回収率調整あり)
 - 5)最小外気量制御のとき、外気導入量 \geq 全熱交用下限値
- 全熱交の熱回収率調整

内外温度差チェックを行うときで可能な場合は、加熱不要で室温を設定値に保つように熱回収率の調整を行う。
- 最小外気制御 (スケジュール・空調装置条件)
 - 1)最小外気制御期間の換気時間帯
 - 2)外気冷房を行っていない(必須)
 - 3)外気導入量 \geq 下限値
- 自然換気許可条件 (スケジュール・屋外条件)
 - 1)自然換気許可時間帯
 - 2)外気温度 \geq 下限値
 - 3)外気相対湿度 \leq 上限値
 - 4)外気露点温度 \leq 上限値
 - 5)屋外風速 \leq 上限値 (室内条件)
 - 6)室温 $>$ 外気温(必須)
 - 7)室内エンタルピ $>$ 外気エンタルピ
 - 8)室温 \geq 下限値 (空調装置条件)
 - 9)加熱処理していない(必須)
 - 10)冷却処理していない
- 自然換気口の開口率調整

開口率100%とすると室温が下限値を下回る場合は、開口率調節により室温を下限値に保つ(開口率は、実際の運転での換気口の開放時間率に相当すると考える)。
- その他の計算上の扱い
 - 1)内外エンタルピ差の許可条件を採用する場合は、外気冷房、全熱交換器の両方に適用する。また、内外エンタルピ差のチェックは、最小外気負荷となるときの室内状態で判定する。
 - 2)自然換気と外気冷房の両方可能な時間帯の室温下限値は、両者の設定値の高い値で統一する。室温が下限値となる場合、自然換気を優先する。

表2 顕熱平衡計算における外気冷房の置換法と結果補正

置換	置換の意味と具体的な条件	熱平衡状態確定後の補正
冷房装置容量の割増	設計外気量を想定する場合。冷却中の自然換気を許可するケースに対して、最大外気導入した場合の冷却熱増分を冷却容量に追加する。	冷却量の割引、外気導入量の換算
下限室温調整用ヒータの想定	最大外気量を想定する場合。下限室温に保つための自然換気量や外気導入量の調整を仮想ヒータによる加熱に置換する。通常の暖房装置が作動すると停止する。最大外気導入による冷却熱増分を相殺する加熱容量を仮定する。	下限室温調整用加熱量から、外気導入量や自然換気の開口率に換算
暖房装置容量の割増	最大外気量を想定する場合。最大外気導入による冷却熱増分を相殺する加熱量を暖房装置容量に追加する。	加熱量の割引、外気導入量への換算

最小外気量制御や全熱交換器を利用する場合は、表中の設計外気量を最小外気量、最大外気量を設計外気量などと適宜変更して対処することができる。

るため、何回か多数ゾーンの熱平衡式を解き、該当する運転状態を探す方法をとるが、計算手順が複雑化し、熱平衡式を解く回数が増える恐れがある。隣接ゾーンの影響を受けるため、繰り返し計算中にハンチングを起こしてなかなか解に到達しない場合も考えられる。そこで、繰り返し計算中の外気導入量については頻繁な仮定値変更を行わず、その代わりに冷暖房装置容量を割増したり、室温制御のための外気導入量調整を仮想ヒータへ置換することにした。これにより熱平衡計算の繰り返し回数を減らすとともに、確実に解が得られるようになる。

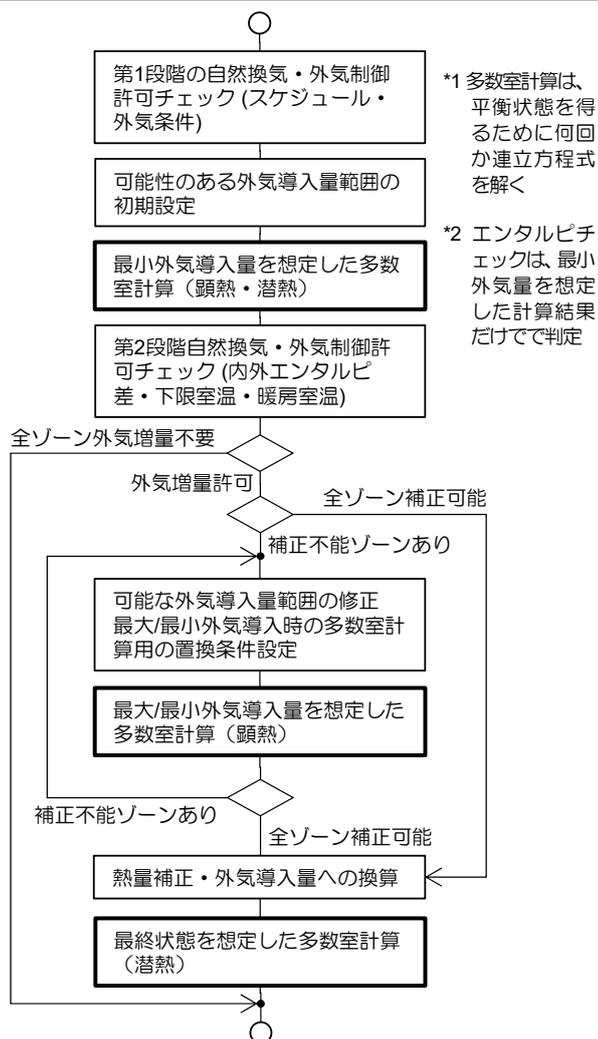


図1 外気制御・自然換気の熱平衡計算フロー

表3 主な計算条件 (オフィス)

気象	EA標準年気象データ (東京)
外気制御	(外気冷房) 下限外気温: 8℃、内外エンタルピチェックあり 外気露点温度: 上限19℃、下限0℃ 下限室温: 夏期・中間期24℃、冬期26℃ 最大外気量: 設計外気量の3倍 (最小外気制御) 下限外気量比(設計外気量に対する比): 0.25 (全熱交換器) 内外エンタルピ、内外温度チェックあり 熱回収効率: 全熱60%、下限外気量比: 0.5
自然換気	(自然換気制御) 自然換気期間・時間: 4-11月・24時間 下限外気温: 15℃、上限外気相対湿度: 90%、 上限外気露点温度: 空調時19℃、 上限屋外風速: 10m/sec 内外エンタルピチェックあり、冷房中も許可 下限室温: 空調時24℃・非空調時22℃ (建物) 8階建て(軒高32m)、計算対象室2階 (換気口) 単位外皮長さあたり有効開口面積: 0.005m ² /m (風圧考慮)
ゾーン	・室: 中間階ペリメータ・インテリア2ゾーン断面 (室奥行き10m、ペリメータ奥行き5m、階高4m) 南向き、ゾーン間換気量250CMH/m ・窓: Low-E複層ガラス・内側明色ブラインド、 窓面積率70% ・内部発熱(最大): 照明10W/m ² 、機器15W/m ² 、 在室者0.15人/m ²
空調	・空調時間8:00-22:00(室使用9:00-22:00) ・設定室温: 夏期(6-9月) 26℃60% 中間期(4・5・10・11月)及び冬期(12-3月) 冷房26℃、暖房22℃40% ・設計外気量: 3.75CMH/m ²

表4 計算ケース

ケース	ケース
対策なし	自然換気・外気制御ともなし
自然換気	自然換気あり・外気制御なし
+外気冷房	自然換気・外気冷房
+最小外気制御	上記ケースに最小外気制御追加
+全熱交換器(全対策)	上記ケースに全熱交追加

図1に外気制御・自然換気を行う場合の熱平衡計算のフローを、表2に顕熱平衡計算における外気冷房の置換法と結果補正法を示す。熱平衡計算では、まず最小外気量を想定して多数ゾーンの平衡状態を求める。全熱交換器を用いる場合は、効率の効果を見込んだ等価最小外気量を用いる。室内状態をもとに自然換気や外気制御の許可判定を行い、全てのゾーンについて、条件設定が正しいか、熱量補正で正解が得られると判定されると、顕熱平衡が解けたことになる。自然換気や外気冷房を許可されたゾーンがあれば、新たに外気量を仮定する。例えば、自然換気と外気冷房が許可され、その下限室温が冷房設定室温より低い場合、自然換気、外気冷房の最大外気量の合計を導入すると仮定する。同時に、下限室温制御用の仮想ヒータ容量の設定と暖房装置容量の割増を行う。この仮定

条件での多数ゾーンの顕熱平衡計算の結果、室温が下限室温より高ければ補正不要、下限室温であれば仮想ヒータ熱量から外気導入量への換算、暖房設定室温であれば熱量補正により解が得られる可能性がある。相互影響のある全ゾーンが再計算不要であれば解は確定する。そうではない場合、室温が下限室温より低ければ外気冷房や自然換気の可能性はないので、外気量仮定値を最小外気量に変更する。条件変更は、基本的に前回の室温に対して変化しないか低くなる方向に行い、ハンチングが起きないようにする。このような手順を繰り返して全ゾーンの運転状態を確定させる。顕熱平衡を解いた後、必要に応じて潜熱平衡の再計算を行う。

4. 自然換気併用外気制御方式の試算結果

東京の南向きオフィスについて、表3に示す計算条件を設定し、表4のケースについて試算を行った。結果を図2~5に示す。図2より、自然換気のみに対して外気冷房も併用すると、中間期に冷却負荷を低減できると同時に、室使用時間帯の室温を低下させ快適にすることができる。図3より、冬期にも外気冷房の利用は可能であるが、加湿負荷が増えたり加湿能力不足が起きている。図4より、自然換気に対して外気冷房を併用する全熱負荷低減効果は、7、8月を除く夏期と中間期に認められる。冬期の冷却負荷はゼロエナジーバンド設定を行う本ケースではもともと小さく、期間全体では外気冷房はほとんど作動しなかった。最小外気制御は冬期と盛夏期に全熱負荷低減効果が大きく、それに全熱交換器を併用する効果は相対的に小さい。図5より、ペリメータゾーンの年間装置負荷は、対策なしに対して自然換気により約10%、外気冷房を併用するとさらに約5%低減される。また、最小外気制御により約15%、全熱交換器を併用するとさらに5%低減される。全手法を採用すると約35%の負荷低減効果があった。インテリアゾーンは、最小外気制御による年間負荷低減効果が約25%と大きく、全手法の採用で約40%の負荷低減が達成された。

5. 結

熱負荷計算において、自然換気を併用する外気冷房、最小外気量制御、全熱交換器による熱回収の計算を可能とし、その有用性を確認した。

【謝辞】本研究の一部は科研費補助金15K06320による。また、(一財)建築環境・省エネルギー機構内に設置された産官学連携による環境負荷削減のための建築物の総合的なエネルギー消費量算出ツール開発に関する「BEST コンソーシアム」・「BEST 企画委員会(村上周三委員長)」および専門版開発委員会(石野久彌委員長)、統合化WG(石野久彌主査)の活動成果の一部であり、関係各位に謝意を表すものである。統合化WG名簿(順不同) 主査: 石野久彌(首都大学東京名誉教授)、委員: 大西晴史(関電工)、木下泰斗(日本板硝子)、工月良太(東京ガス)、郡公子(宇都宮大学)、菰田英晴(鹿島建設)、佐藤誠(佐藤ER)、芝原崇慶(竹中工務店)、新武康(清水建設)、田中拓也(大成建設)、長井達夫(東京理科大学)、二宮秀典(鹿児島大学)、相沢則夫(大林組)、野原文男、長谷川巖、滝澤総、二宮博史、丹羽勝巳、久保木真俊、大浦理路(以上、日建設計)、柳井崇、品川浩一、山本佳嗣(以上、日本設計)、小林信裕(前田建設工業)、事務局: 生稲清久、石田真理(建築環境・省エネルギー機構)

【図2、3注記】換気回数はペリメータゾーン容積基準。

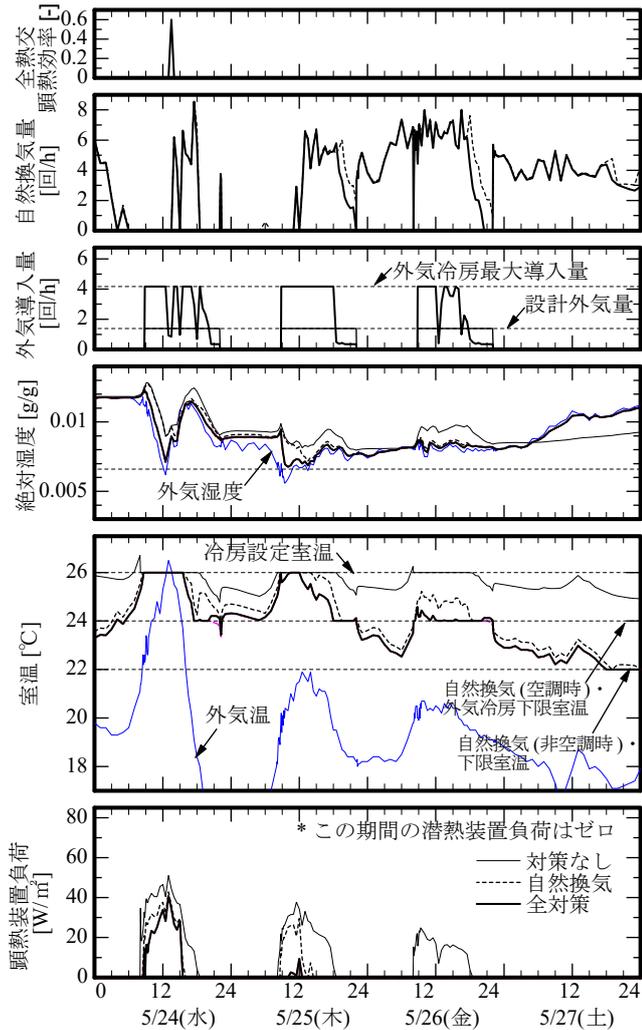


図2 中間期代表4日間の室内環境・負荷と外気制御状態

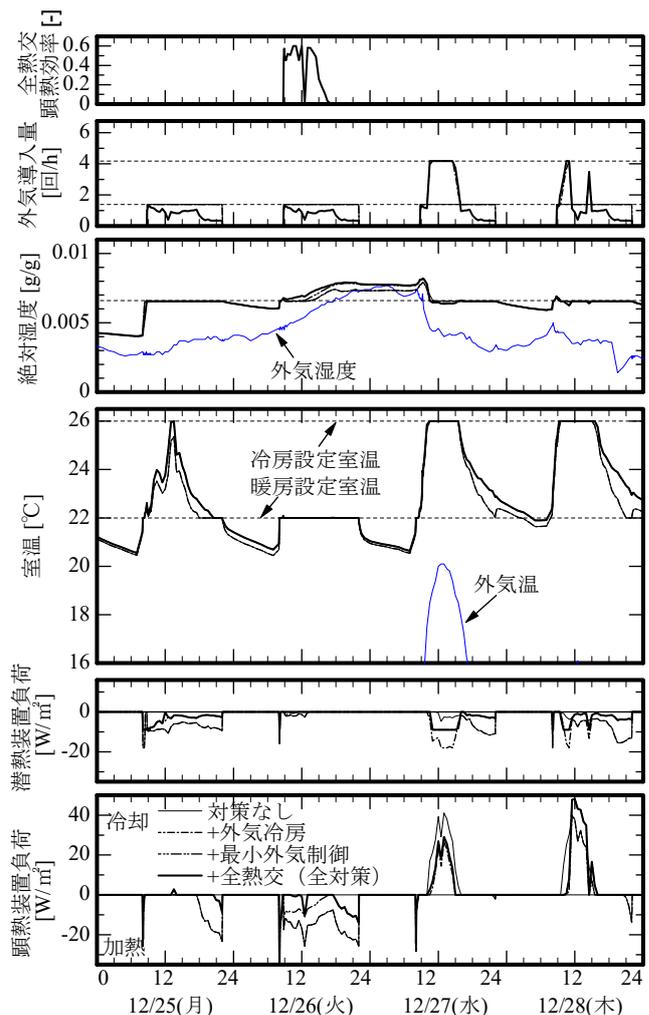


図3 冬期代表4日間の室内環境・負荷と外気制御状態

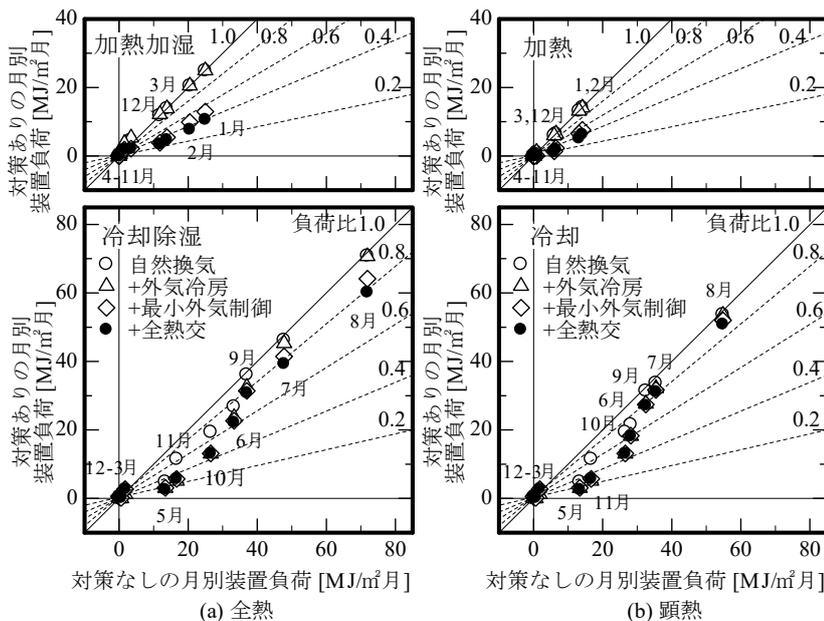


図4 自然換気・外気制御の対策有無と月別装置負荷の相関

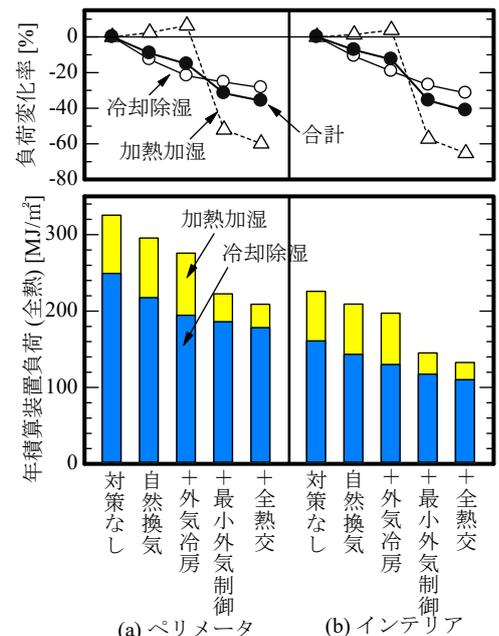


図5 各ケースの年間装置負荷

【図4、5注記】「加熱加湿」は加熱負荷と加湿負荷、「冷却除湿」は冷却負荷と除湿負荷の和。

【文献】1) 郡他：建築エネルギー・環境シミュレーションツール BEST の開発 第53報、第63報、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.965-

966、2015.9、2016.9 2) 郡他：外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発 その132、その158、空気調和・衛生工学会学術講演論文集、pp.9-12、2014.9、pp.21-24、2015.9